

소외전원상실사고 빈도수 분석을 통한 원전 신뢰도 검토기준

Review Criteria for Reliability from Analysis of LOOP frequency in NPPs

문수철[†] · 김진중^{*}
(Su-Cheol MOON · Kern-Joong KIM)

Abstract - LOOP(Loss of Offsite Power) and SBO(Station Blackout) events have been occurring in nuclear power plants should be reviewed and be controlled on important electrical equipments by professional engineer to prevent and to safety improvement from safety assessment and reliability analysis report. LOOP and SBO occasionally happened by internal or external causes. This paper contained that LOOP frequency in the United States NPPs and in the domestic NPPs have compared and analyzed data by the past lessons and probabilistic statistics. Additionally will be installed MG(Mobile Generator) according to the lessons of Fukushima nuclear accident in Japan, which CDF(Core Damage Frequency) and LOOP frequency have reconsidered. And this paper proposed to reduce reliability criteria using PSA(Probabilistic Safety Analysis).

Key Words : LOOP, Reliability, SBO, LOV, Tsunami

1. 서론

국내·외 원자력발전소에서 소외전원상실사고(Loss of Offsite Power)는 소내 교류전원 완전상실인 소내 정전사고(Station Blackout)를 발생하는 초기 사건(Initial Event)이기 때문에 원전 관계자들은 중요 Risk 항목으로 분류하여 관리하고 있다. 지난 2011년 3월에 발생한 일본의 후쿠시마 원전사고는 기존의 설계개념을 상회하는 자연재해로 인해 독립된 3개의 소외전원 중 1개가 상실되었으나 건전한 2개의 소외전원은 Tsunami에 의해 상실되면서 소내 배전반이 침수되고 소내 필수부하에 전원을 공급하기 위해 설치한 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator)의 자동 및 수동기동 실패로 가용 가능한 소내 비상전원을 확보하지 못하였다. 이로 인하여 원자로 노심을 강제 냉각시키기 위한 필수 기능용 전원 확보가 지연되면서 1986년 소련의 체르노빌 원전사고 이후 최악의 사고로 기록되게 되었다.

원자로 노형별 설계특성에 따라 차이가 있으나 원자로노심이 용융되기 시작하는 제한된 시간 이내에 소내·외 전원복구가 불가능하였고 추가로 긴급하게 확보한 이동형 발전기(Mobile Generator) 등의 가용 전원도 당시의 환경적인 영향으로 인하여 적기에 확보하지 못하였다.

이로 인하여 전 세계적 원전 운영국가들은 자국내 안전성과 설계기준사고를 초과하는 자연재해에 대한 대처능력을 확보하기 위한 스트레스 테스트(stress test)를 수행하는 기간인 2012년 2월에 고리 1호기에서 발전기 보호계전기 시험 중 인적실수로 LOOP가 발생하고 소내 교류전원이 완전 상

실되는 SBO까지 확대되는 사건이 전파되면서 국내 원전에 대한 불안감이 증가되면서 소외전원과 EDG에 대한 중요성이 다시 부각되었다.

원전에서 LOOP는 우선전력계통인 PPS(Preferred Power System)가 어떤 원인으로 인해 선로가 완전 또는 부분 상실될 경우에 발생하며, SBO는 LOOP 발생으로 안전모선(1E BUS)에 설치한 저전압계전기(Under Voltage Relay)의 설정값에 의해 저전압(Under Voltage) 또는 전압상실(Loss Of Voltage)시 대기상태의 EDG가 자동기동 실패되어 일시적 또는 장기적으로 소외교류전원과 소내 교류전원이 완전 상실되는 상태를 말한다.

따라서 본 논문에서는 고리 1호기 상업운전이 시작된 1978년부터 2009년까지의 국내 원전의 총 운전시간과 LOOP 발생원인 및 건수에 대한 상관관계를 미국 NRC(Nuclear Regulatory Committee) 분석방법에 따라 빈도수(Frequency)를 계산하였고, 예방방지 가능한 신뢰성 검토기준을 제시하였으며, 사례분석으로 MG를 이용한 FTA(Fault Tree Analysis) 분석결과로 원전의 안전성과 신뢰도가 향상됨을 입증하였다.

2. 기본개념

원자력발전소의 PPS는 IEEE 765에서 언급하는 바와 같이 소외전력계통(Offsite Power System)으로부터 안전등급(class 1E) 모선 부하에 전력을 공급하기 위한 설비로 그림 1과 같다[1]. 구성 기기로는 스위치야드내의 Power Circuit Breakers, 독립된 2개의 소외전원을 위한 Transmission Lines, Power Transformers(Main Transformer, Unit Auxiliary Transformer, Standby Auxiliary Transformer), Main Generator, 1E Circuit Breakers, BUS, EDG 및 AAC DG(Alternated AC Diesel Generator) 등이 있으며, 여기에 Protective Device and Relay and Insulation Coordination 등이 포함된다. 본 논문에서 사용된 주요 기본적인 개념은 다음과 같다

* Dept. of Electrical Engineering, National Chungnam University, Korea

† Corresponding Author : I&C&Electrical System, Korea Institute of Nuclear Safety

E-mail : mscheol@kins.re.kr

Received : April 3, 2012; Accepted : January 28, 2013

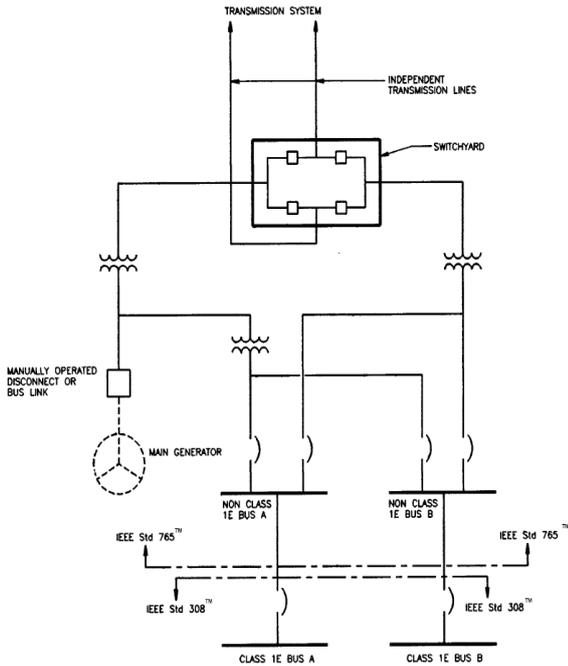


그림 1 우선전력계통 설계도

Fig. 1 An example of an acceptable PPS design by Figure 2 of IEEE 765

2.1 소외전원상실사고(LOOP)

표준원전은 그림 1과 같이 소외 송전계통에서 스위치야드 설비까지 독립된 2개 이상의 선로로 구성된다. Main Generator와 Power Transformer(Main Transformer)가 직결되어 있으며 Main Generator가 가동 시 전력을 Power Transformer(Main Transformer)를 통해 소외 전력계통(Grid System)으로 공급하고 비정상적인 조건 또는 O/H(Overhaul)에는 다른 한 개의 소외송전선로로 Power Transformer(Standby Auxiliary Transformer)를 통해 소내 안전모선에 전력을 공급받음으로써 원자로 노심의 잔열을 제거하도록 구성하고 있다.

2.2 저전압(UV), 전압상실(LOV)

표준원전은 그림 1과 같이 LOOP 발생시 1E 모션에는 순간적 또는 일시적인 저전압(Under Voltage)으로 1E 모션에 설치한 UVR의 설정값에 의해 탐지되는 상태를 말하며, LOV는 EDG에 자동 기동신호를 보내는 기준이 된다. 표준원전은 EDG가 10초 이내 자동 기동하여 12초 이내 사전 계획된 부하에 전력을 공급하도록 규정하고 있다[2].

2.3 소내 교류전원 완전상실(SBO)

일반적인 발전소에서 SBO는 LOOP에 따른 LOV 신호에 의한 EDG가 자동으로 기동하여야 하나 기동이 실패되어 소외전원과 소내 교류전원이 동시 상실된 지난 고리1호기와 같은 사건을 언급한다. 국내 원전에는 SBO를 대비하여 대체교류전원인 AAC를 설치하여 운영하고는 있으나 AAC는 EDG와 같이 설계단계에서부터 안전등급에 준하는 Seismic을 고려하고 있지 않으므로 지진발생에 따른 EDG 기동실패

시 AAC 전원 확보가 불충분하다.

3. LOOP Frequency

국내는 주기적 안전성분석보고서 검토 시 LOOP 빈도수의 타당성을 검토하고 있으나, 해외(미국)에서는 매년마다 LOOP 빈도수를 평가하여 NUREG/CR-6890의 Volume으로 발간하고 있다. NRC는 FERC(Federal Energy Regulation Commission)와 NERC(North American Electric Reliability Corporation) 기관 간 상호 주기적인 협력을 통해 소외전력계통에 대한 정보를 교환하고 있으며, 최근에는 확률적인 개념을 반영하여 신뢰도 평가기법에 활용하고 리스크 저감에 노력하고 있다[3].

3.1 Frequency

고장률 또는 고장빈도수는 총 운전기간에 고장건수를 나누어 계산한다. 가령 100년 동안 1건의 고장 또는 사건이 발생한다면 1/100=1.0E-02(건/년)으로 계산된다. 따라서 총 운전기간 f(t) 동안 해당 기기 또는 설비의 총 고장건수를 N이라 하면 고장빈도수 F(t)와 건전한 기기의 빈도수 R(t)는 다음 식과 같은 일반식으로 정리된다.

$$F(t) = \frac{N}{f(t)} \tag{1}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{N}{f(t)} \tag{2}$$

$$F(t) + R(t) = 1 \tag{3}$$

3.2 해외사례

2005년의 미국 EIA 보고서(Energy Information Administration, Form EIA-860, "Annual Electric Generator Report")에 의하면 원전은 총 전력생산의 약 20%로 기저부하용을 담당하고 있는 것으로 파악되고 있으며, 최근 일본의 후쿠시마 원전사고 이후 미국내의 운영원자로 총 104대에 대해 Stress test를 수행하였고 원전의 건전성을 장·단기적으로 평가를 수행하고 있는 것으로 확인되었다[4].

PPS는 비안전등급설비로 국내와 같이 규제범위가 아니지만 NRC와 FERC는 2003년 북미대정전사고 이후 신뢰도 기관인 NERC에게 Interface 설비에 대한 관리지침(NUC-001-1, Nuclear Plant Interface Coordination)을 2007년 제정·발효함으로써 발전사업자와 계통운영사업자간의 공용설비에 대한 문제발생시 해결지침으로 활용하고 있다.[5] 중수로원자로를 설계하여 운영하고 있는 캐나다인 경우는 CNSC(Canada Nuclear Regulatory Safety Commission)에 의해 자국내 원전 규제를 수행하고 있으며 규제지침은 S-98를 제정하여 활용하고 있다[6].

3.2.1 미국원자력 발전소 LOOP 원인별 빈도수

NUREG/CR 6890 보고서에 의하면 LOOP 원인은 Plant, SWYD(스위치야드), Grid, Weather 등 4분류로 구분하고 있으며 미국내 전력산업구조개편전과 후의 발생건수별 빈도수와 원인별 분류를 요약하면 표 1과 표 2와 같다[3].

표 1 미국 전력산업구조개편 전과 후의 LOOP 발생빈도
Table 1 Power System Restructure LOOP Event and Frequency (Before and After)

Items	Category	1986-1996			1997-2004		
		Event	Op/Year	Frequency	Event	Op/Year	Frequency
Operation	Plant	11	877.2	3.31E-02	1	724.3	2.07E-03
	SWYD	23	877.2	2.68E-02	7	724.3	1.04E-02
	Grid	1	877.2	1.71E-03	13	724.3	1.86E-02
	Weather	3	877.2	3.99E-03	3	724.3	4.83E-03
	Total	38	-	4.56E-02	24	-	3.59E-02
Stop/Maintenance	Plant	14	278.5	5.21E-02	5	104.7	5.25E-02
	SWYD	31	278.5	1.13E-01	7	104.7	7.16E-02
	Grid	1	278.5	5.39E-03	2	104.7	2.39E-02
	Weather	9	278.5	3.41E-02	4	104.7	4.30E-02
	Total	55	-	2.05E-01	18	-	1.91E-01

표 1에서 같이 전력산업구조개편 전 운영 및 O/H 발전소에서 SWYD 원인인 경우 총 54건이 발생하여 58% 비율을 차지하였고 구조 개편이후 계통망에서는 총 14건이 발생하여 33.3%를 차지함을 보여준다. SBO를 발생할 수 있는 Event를 포함할 경우 31건으로 22.6%이며 국내 원전인 경우 지형적인 조건에 의해 표 4와 같이 Weather에 의한 건수(6건, 40%)가 대다수이나 미국내 원전은 19건(14%)으로 대조적임을 보여주고 있다. 표 1의 Category는 SBO와 LOOP가 발생시킨 event로 전력산업구조개편 전(10년)보다 개편 후(7년)의 발생빈도수가 증가형향임을 보여준다.

따라서 표준으로 제안된 Rule(Standard, Guideline)뿐만 아니라 국지적, 문화적 평가도 반영되어야 한다.

표 2 LOOP 원인별 분류

Table 2 Event Count LOOP cause

Category	External	Hardware	Human Error		Power System	Weather Worst	Total	Percent (%)
			OP	O/H				
Plant	-	11	8	12	-	3	34	23
SWYD	-	42	3	21	1	8	75	51
Grid	-	3	1	-	14	-	18	12
Weather	6	-	-	-	-	15	21	14
total	6	56	12	33	15	26	148	100
Percent	4	38	8	22	10	18	100	

NUREG/CR 6890 보고서에 따라 35건이 증가한 원인별 분류는 표 2와 같이 SWYD에 의한 LOOP가 51%를 차지하며 이 중 O/H 기간의 인적실수가 운영발전소의 2.75배 증가하며 총 22%를 차지하고 있다. 국내원전의 경우도 표 3과 같이 최근 사건이력에 따르면 LOOP 건수 총 15건 중 3년이 하가 20%로 최근 경향분석으로 증가추세로 안전문화에 대한 대책이 필요하다.

3.2 국내사례

한수원(주) 2009년 원자력발전연보에 의하면 원자력은 총 발전량의 34%이고 제5차 전력수급기본계획에 의하면 2012년에는 34%에서 2016년에는 총 발전량의 40%를 담당하도록 기본계획을 수립한 것으로 확인되었으나 최근 동향으로

제6차 기본계획에서는 확정하지 못하였다[9].

에너지 평균화정책에 의해 신재생에너지가 점진적으로 증가하고는 있으나 전력수요에 따른 공급면에서는 한계성이 있으므로 원자력에 대한 국민적 동의가 절대적으로 부족할 경우 화력발전소 건설이 일시적으로 증가할 것이다. 따라서 정보공개 및 안전성을 최우선으로 하여야만 안정적인 전력 공급원으로 기여할 것으로 판단된다.

3.3.1 국내원자력 발전소 LOOP 발생이력

고리1호기 이후 2009년까지 LOOP 발생건수는 한국원자력안전기술원 사고고장보고서에 따라 분류하였고 세부내용은 표 3과 같다

표 3 LOOP 발생이력[1][2]

Table 3 LOOP Event in Korea (*source: Http://opis.kins.re.kr)

No	Plant	Occ. Time	Occurrence Causes	RTN. time
1	W1	85.04.19	#1, #2 T/L trip by CB trip delay	85.04.25
2	K4	86.08.28	LA destroy, M.Tr 87r by storm	86.09.04
3	K2	87.04.21	T/L grounding and short	87.04.22
4	K1	87.07.15	T/L short and cascading by storm	87.07.15
5	K2	87.07.16	T/L trip and cascading by storm	87.07.17
6	K3	87.07.17	T/L trip and cascading by storm	87.07.18
7	K4	93.01.17	PCB trip at SWYD pro' relay (HE)	93.01.17
8	U2	97.01.01	T/L short and grounding by storm	97.01.01
9	U1	01.01.30	M.Tr B HV overheating	01.02.02
10	Y5	02.11.03	TBN H vibration and T/L grounding	02.11.05
11	Y6	02.11.03	#1T/L trip On Pre-operation	02.11.05
12	W2	04.06.19	ES close during O/H in SWYD (HE)	04.06.23
13	Y5	06.11.29	M.Tr SPR mis-operation during O/H	06.11.30
14	K1	08.08.08	T/L 2lines was lighting at same time	08.08.11
15	W2	09.09.03	Gen 32r injection for O/H (HE)	09.09.03

미국 NRC 보고서 NUREG-6890의 기준에 따라 LOOP를 분석하여 국내 사례를 분류한 결과, 총 15건이며 세부 부지별 원인별 분류는 표 4와 같고 표 3에서 HE(Human Error)에 의한 건수는 3건이며, O/H 중 발생한 건수는 3건이다.

지형적인 원인으로 태풍, 낙뢰 등의 기상변화에 의해 발생한 건수가 6건으로 분석되어 미국과는 다른 경향을 보이고 있다. LOOP 발생 원인별 분류는 표 4와 같으며 전력산업구조개편 전과 후의 LOOP 발생빈도수는 표 5와 같다.

표 4 LOOP 발생 원인별 분류

Table 4 LOOP cause classification

Category	KR	YK	WS	UJ	Total
Plant	0	3	1	1	5
Grid	1	0	1	0	2
Weather	5	0	0	1	6
SWYD	1	0	1	0	2
Total	7	3	3	2	15

3.3.2 전력산업구조개편 전과 후 LOOP 원인별 발생빈도

국내 전력산업은 미국과는 시기가 다르지만 2001년 4월에 6개의 발전운영사업자와 1개의 계통운영사업자로 분류되었

으며 이에 따라 LOOP 발생 건수별 빈도수를 표 6와 같이 계산하였다. 본 항은 3.2.1항에서 언급한 바와 같다.

표 5 전력산업구조개편 전과 후의 LOOP 빈도수

Table 5 Power System Restructure LOOP Event and Frequency (Before and After)

Plant	1978.5-2001.4			2001.5-2009.12		
	Event	Op-Year	Frequency	Event	Op-Year	Frequency
KR	6	24.45	2.453E-01	1	11.57	8.64E-02
YK	0	14.69	-	3	16.97	1.76E-01
WS	1	10.05	9.91E-02	2	11.64	1.72E-01
UJ	2	10.67	1.87E-02	0	15.43	-
Total	9	59.86	1.50E-01	6	55.61	1.08E-01

4. 신뢰도 검토기준

본 논문의 제3절에서는 국내의 LOOP 발생건수에 대한 동향과 분석결과에 따라 LOOP 발생원인은 지형적, 문화적 원인이 주류를 이루고 있으며 미국의 환경조건과는 상이하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 국내의 문화적, 지형적 특성을 충분히 고려하고 기기나 계통이 기본적으로 요구되는 성능을 충분하게 보장할 수 있도록 기기 및 계통의 신뢰도를 확보하는 것이 중요하다 판단한다.

이를 위해서는 생산단계에서부터 최종검사단계까지의 체계적인 분석시스템 구축이 필요하고, 각 단계마다 표준화되고 통일된 기술기준을 적용하고 숙련된 고급기술자에 의해 검토가 수행되어야 할 것이다. 이를 위해 NRC와 동일한 분류 방법을 사용하여 신뢰도 검토기준을 다음과 같이 제시하고자 한다.

4.1 Plant related

Main Generator, Main Transformer 등의 주요전력설비에 대해 보호 장치 이중화, Backup power source 등을 추가 구성하여 오동작을 방지하고 계통변경 및 증설에 따른 원자로 불시정지를 유발시키는 기기와 고장 또는 사건 발생의 근본원인에 대해서는 Fault Current Calculation, Protective Coordination 검토 및 Quality Assurance 등의 절차에 따라 Quality Activity를 강화하고 사업자에 의해 특성화되고 전문화된 훈련을 통한 자발적인 개선노력과 제3자의 입장에서 타당성이 검토되어야 한다.

4.2 Switchyard related

표준원전 스위치야드는 4Bay 당 2개의 Main Generator를 연결하고 있고, 2Bay는 타 발전소와 Tie-Line으로 구성되어 한 호기가 정지 시 1개의 송전선로에만 전력을 의존하게 되어 정지 또는 O/H중에 계통사고파급이나 사업자간의 불명확한 의사소통으로 LOOP 빈도수가 증가하고 있으므로 연계선로에 대한 운영권을 재평가하는 방안 또는 1Bay 이상을 추가하여 운영하고 원전의 고유 특성을 고려할 필요성이 있으며 1Bay에 발전과 송전을 병행 사용하지 않는 설계개념에 대한 인식전환이 필요하다.

4.3 Grid related

계통망은 송전 및 계통사업자에 의한 고장파급으로 LOOP가 발생할 수 있으므로 초기의 계통안정도 분석결과와 계통증설 및 변경, 유지보수 시 분석결과를 사업자간에 상호 정보를 공유하고 분석하게 하여 발전소 운영과 정보에 활용하도록 하고 고장파급을 최소화하기 위해 보호협조를 포함한 고장발생 트립 요소에 대해서는 병행된 사전 정비 및 예방활동을 강화할 필요가 있다.

4.4 Weather related

미국 등 광역지역에서는 뇌격일수에 대한 통계를 조사하여 최적의 전원입지구성을 검토하고 있으나 국내의 제한적인 지형적 설치장소로 기상원인에 의한 LOOP 발생이 불가피하게 발생되면서 염해나 뇌격을 저감할 수 있는 방안으로 전력기기 절연강도를 향상시키거나 절연협조를 합리적으로 구성하는 것이 현실적으로 합리적인 것으로 평가되어 지형적 평가가 분석되어야 한다.

4.5 Safety Culture related

최근 발생하는 LOOP의 대부분은 인적실수에 의한 것으로 안전문화의 중요성은 기술적 진보에 따라 추종하지 못하고 있는 것으로 분석되었다. 작업자의 단순 실수에서부터 계통회로에 대한 이해부족 등의 다양한 원인에 의해 기인하고 있으므로 작업 전 관련 계통에 대한 충분한 이해와 감독과 작업자가 함께 필수 안전교육이 선행되어야 하고 무엇보다 실질적이고 체계적인 교육과 자격관리 절차가 필요하다.

5. SBO 및 LOOP 빈도수 저감 사례연구

5.1 사례연구 방법

운영 중인 발전소는 전력기에 대한 On-Line 상태감시를 통해 시스템의 이상여부만을 파악할 수밖에 없지만 O/H 중인 발전소는 온라인 감시상태에서 정밀을 요하는 항목에 대해서 많은 시간과 공정을 투입하여야 개선할 수 있다.

따라서 3.2절 및 3.3절에서 LOOP 및 SBO를 발생하는 원인에 대한 저감 사례연구는 4.1항의 보완적인 일례로 수행하였다. 연구방법은 근래의 최악의 원전사고로 기록하고 있는 후쿠시마 원전사고 시 최소한의 대비책으로 평가하고 있는 이동형 교류전원(Mobile Generators) 설비이며 MG가 충분히 확보되고 사용가능한 것으로 가정하여 중대사고 분석용인 PSA(Probability Safety Analysis) Tools[8]를 활용하여 FTA(Fault Tree Analysis)를 분석하였고, 평가에 사용한 자료는 2009년 원자력발전연보에 의해 총 2,528,845시간으로 계산된 115.47년을 사용하였다[9].

5.2 MG 반영 전 FTA 결과

계산식 (1)에 의해 LOOP 빈도수를 구하면 1.30E-01(건수/년)이다. 총 15건 중 LOOP 원인별로 Weather(6), Plant(4), Grid(3), SWYD(2)이며 각각의 빈도수는 다음 그림 2와 같으며 그림 3은 발전소별 LOOP 빈도수를 나타내었다. 그리고 그림 4와 그림 5는 MG를 반영하기 전과 후의 CDF 분석결과로 제3자 검증을 통해 최종 제출한 표준원전 울진 5,6호기 PSA 보고서(한국원자력안전기술원, 2006)의 LOOP와 CDF 빈도수 2.20E-02, 3.82E-07의 값과 비교하여 검증하였다[7].

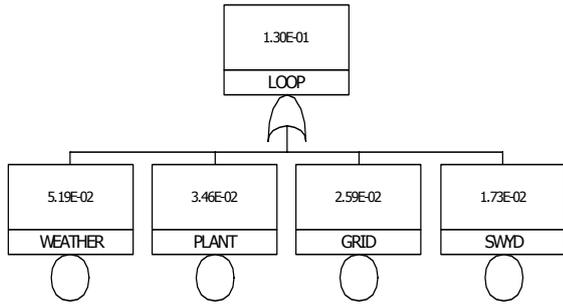


그림 2 원인별 고려한 고장나무분석
Fig. 2 FTA per Causes

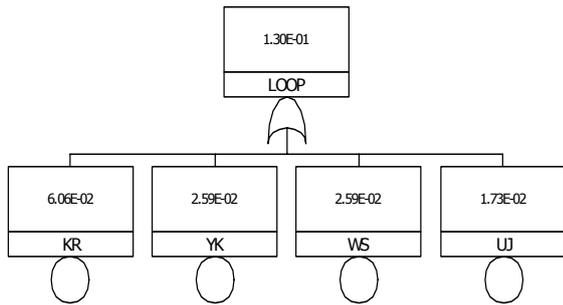


그림 3 부지별 고장나무분석
Fig. 3 FTA by Sites

5.3 MG 반영 후 FTA 결과

그림 4와 그림 5는 MG가 최적의 성능을 보증할 경우 CDF 감소분을 확인하기 위해 본 논문에서 검토한 결과이다. 2.20E-02는 울진 5,6호기 PSA 분석당시 국내 경수로 발전소 운전기록(년)에 LOOP 건수 3건을 이용하여 계산한 결과이기 때문에 본 논문의 발전소 운전기록과 LOOP 발생건수로부터 계산한 빈도수와는 상이한 값을 갖는다.

CDF 빈도수 3.82E-07는 CDF에 영향을 주는 여러 변수(냉각재상실, 급수상실, 기기냉각수상실 등)를 이용하여 간략화하기 위해 Boolean Function를 사용한 것으로 CDF는

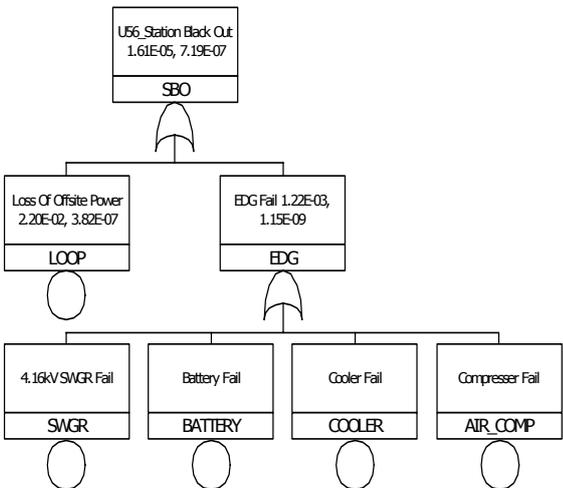


그림 4 부지별 고장나무분석(전)
Fig. 4 FTA by Sites(Before)

LOOP값인 2.20E-02값보다 항상 작은 값을 갖는다. Fault Tree에서의 수치는 초기사건빈도(건/년)와 CDF(건/년)를 나타내므로 분석확인 방법 중 CDF가 LOOP 보다 크다면 다른 여러 변수의 값이 크다는 것을 의미한다.

따라서 후쿠시마 원전사고 이후 EDG나 AAC가 필수부하에 전원을 공급하지 못할 경우 MG에 의해 필수전력을 요구하는 시간내에 충분하게 공급한다고 가정할 경우 MG Fail은 성립하지 않는 것으로 평가하고 있음으로 그 결과는 그림 5와 같다. MG를 투입하기 전에는 CDF가 7.19E-07이었으나 MG에 의한 필수전력을 제한된 시간내에 공급하여 제기능을 발휘한다고 가정한 결과는 8.10E-07로 114% 증가함으로 설비 추가는 CDF와 LOOP 신뢰도 향상에 효과가 있다고 분석되었다.

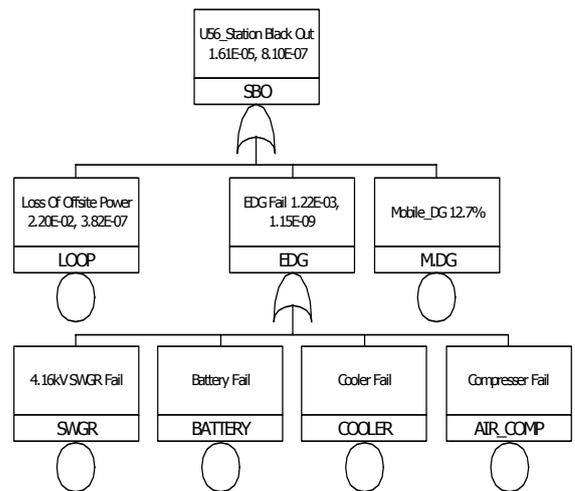


그림 5 U56 SBO 고장나무(후)
Fig. 5 U56 SBO Fault Tree (After)

신뢰도 검토기준 향상을 위한 사례연구는 PSA 분석결과를 활용하여 신뢰도 검토기준은 4.1항에 국한하여 수행하였지만 SBO나 LOOP 발생원인은 4.2항에서 4.5항까지 모두 포함하므로 각 분류항목에 대한 추가적인 설비개신이나 안전문화를 제고할 경우 CDF에 영향은 감소되어 후쿠시마와 같은 동일한 사고는 재발하지 않을 것이며, LOOP 빈도수를 충분히 저감함으로써 원전 안전성은 향상할 수 있을 것으로 판단한다.

6. 결 론

일본 후쿠시마 원전사고와 고리 1호기 사건이후 주목받고 있는 LOOP와 SBO에 대한 개념과 빈도수를 계산하여 LOOP와 SBO를 사전 예방할 수 있는 신뢰도 검토 기준과 PSA 사례연구를 통해 저감방법을 제시하였다.

원전 안전성과 국민 신뢰성을 향상하기 위해서는 신규로 건설되는 원전뿐만 아니라 운영발전소도 장기적으로 사건을 최소화하기 위해서는 안전등급이외의 비안전등급의 중요 전력계통에도 확률론적인 개념을 반영할 필요가 있다. 이는 발생 가능한 모두 변수를 포함하여 분석하고 정보를 공개하여 불신의 오해를 최대한 해소하고자 노력한다면 대국민에 대한

신뢰를 회복시키는 주요한 방법이 될 수 있다고 판단한다.

다만, 확률론적인 분석은 무한한 가정적인 실험적 근거가 아닌 과거의 경험적이고 객관적인 통계자료 활용이 전제되어야 하고 분석단계에서는 전문분야의 전문가의 분석과 함께 제3자의 객관적인 검토가 필요하다 판단한다. 또한, 국내 규정이나 적용 지침 또는 요건에 대해서도 외국의 규정을 답습하기 보다는 국내의 문화적인 특성에 맞는 규정을 합리적인 범위내에서 개발하여 적용할 필요가 있다.

References

- [1] IEEE 765, "IEEE Standard for Preferred Power Supply (PPS) for Nuclear Power Generating Stations", p4, 2002
- [2] The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, "Review on tolerance factors for 1E UVR setting at NPPs", pp367~372, MOON Su-Cheol, KIM Kern-Joong, 2011.
- [3] NUREG/CR-6890, Vol.1, "Reevaluation of Station Blackout Risk at Nuclear Power Plants", p15-65, 2005
- [4] USNRC, "The Near-Term Task Force Review of Insights from The Fukushima Dai-Ichi Accident", p69, 2012
- [5] US NERC NUC-001-1, "Nuclear Plant Interface Coordination", 2007
- [6] CNSC Standard S-98, "Reliability Programs for Nuclear Power Plants", 2005.
- [7] KPX, "Electric Power Market Statistics", p19, 2009.
- [8] KINS, "Uljin 5,6 PSA Report", pp157, 2006
- [9] KHNP, "2009 Nuclear Power Generation Chronology", pp152-155, 2010

저 자 소 개



문수철 (文修哲)

1973년 8월 22일생. 1996년 제주대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 ~ 2005년 한국전기안전공사. 2005년 5월 ~ 현재 한국원자력안전기술원. 발송배전기술사. 2008년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사), 2010년 ~ 2012년 동 대학원 전기공학과 박사(수료)



김건중 (金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1980년~현재 충남대 전기공학과 교수