

국내 가압경수로형 원전의 원자로 운전 년수 누적에 따른
소외전원 상실사고 빈도 개선

Improvement of Total Loss of Off-Site Power Frequency
with Reactor Year Cumulation of PWR Plants in Korea

권종주

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 460

요약

국내 가압경수로형 원전의 소외전원 상실빈도를 1998년 12월 말 기준으로 개선하였다. 이를 위해 국내 원전의 불시정지 사례를 검토하고 그 중에서 소외전원 상실과 관련된 사건을 NSAC의 분류기준에 따라 분류하였다. 기록 자료만으로 사건의 전개 과정 및 현황 파악이 미흡한 경우에는 해당 발전소의 관련자와 면담을 통하여 자료의 신뢰성을 높였다. 국내 원전의 증가 및 운전 이력 증가에 따른 우리 나라 가압경수로형 원전의 총 누적 운전 년수 또한 1998년 12월 말 기준으로 다시 산정하였다. 분석 결과 국내 가압경수로형 원전의 소외전원 상실빈도는 1991년 12월 말을 기준으로 한 6×10^{-2} 회/년보다도 약 50% 정도 개선된 3.13×10^{-2} 회/년으로 나타났다. 이 값은 1995년을 기준으로 한 미국의 소외전원 상실빈도 4.6×10^{-2} 회/년보다도 약간 낮은 것으로 나타났다.

Abstract

The loss of off-site power(LOOP) frequency of PWR plants in Korea was improved as of December 1998. LOOP events were selected from plant records such as events reports, and the selected events were classified in accordance with grouping criteria in NSAC reports. An interview with plant staff was performed to support data accuracy. The cumulative reactor operation year also has been recomputed as of December 1998. The results shows the improved data as 3.13×10^{-2} /RY that has been reduced approximately 50% compared to the previous data. This value is slightly lower than US data, 4.6×10^{-2} /RY.

1. 서론

원자력 발전소에 대한 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)를 의미 있

게 분석하고 또한 그 결과를 위험도에 근거한 원전의 운전, 정비 및 규제(Risk-Informed Regulation)에 활용하기 위해서는 원전 위험도 평가의 척도가 되는 노심손상빈도 계산에 결정적인 요소로 작용하는 초기사건 빈도와 기기의 고장확률을 해당 발전소의 고장 경험 및 운전 이력을 반영한 데이터를 사용하여야 한다.

현재까지 국내외에서 수행된 확률론적 안전성 평가 결과를 보면 발전소 정전 사고(Station Blackout, SBO)가 노심손상빈도에 기여도가 큰 사고 경위 중의 하나로 나타났다. 발전소 정전 사고란 발전소에서 원자로 및 주발전기 정지 이후 외부에서 공급되는 소외 전원이 상실된 후에 비상 디젤 발전기의 정상 기동 및 지속적인 운전 실패에 의해 발전소의 모든 교류전원이 상실되는 사고를 일컫는다.

소외 전원 상실은 소외 전력망 혹은 스위치 야드의 상실이나 소내 배전 계통의 이상에 의해 발생될 수 있다. 소외 전원 상실 후에는 대부분의 비안전등급 부하에 교류전력 공급이 상실된다. 그러나 안전 등급 부하와 선택된 비안전등급 부하는 비상 디젤 발전기로부터 비상전력을 공급받는다. 소외전원 상실 시에 전기계통의 전력공급 방식이 달라지기 때문에 일반 과도 사건과는 달리 별도로 독립된 초기사건으로 취급된다.

이처럼 발전소 정전사고에 중요한 원인 중 하나인 소외 전원 상실 사고는 원자로 운전 년수가 누적됨에 따라 고장 이력을 반영하여 주기적으로 재분석되어야 한다. 본 논문에서는 한국원자력연구소에서 정부 주도 중장기 과제의 1차 연도 연구에서 1991년도 12월 31일을 기준으로 분석한 결과를 보완하기 위해 수행되었다.

소외 전원 상실 사건 분석을 위해서 국내에서 가동 중인 10개 가압경수로형 원전(고리 1/2/3/4호기, 영광 1/2/3/4호기 및 울진 1/2호기)의 상업운전일로부터 1998년 12월 31일까지의 소외 전원 공급계통 고장으로 인한 발전소 불시 정지 이력에 관한 자료를 수집, 검토하여 국내 가압경수로형 원전의 소외 전원 상실 빈도를 다시 계산하였으며 그 결과는 현재 진행 중인 영광 5,6호기와 울진 5,6호기의 Level 1 PSA 내부사건 최종 정량화에 사용되었다.

2. 본론

2.1 소외전원 상실 사고 관련 발전소 불시 정지 사례 조사

소외 전원 상실은 원자력 발전소에 연결된 주 송전선과 보조 송전선이 소내외적인 요인으로 인하여 송배전 기능을 수행하지 못하게 되는 사건을 말한다. 현재까지 국내 원전에 대한 소외 전원 상실 사건에 대한 분석은 “고리 3/4호기 및 영광1/2호기의 1단계 확률론적 안전성 평가” 수행을 위해 최초로 분석된 이래 정부 주도 중장기 연구로 한국원자력연구소에서 수행한 “국내 원전 소외전원 상실사건 및 고리 3,4호기 비상 디젤 발전기 신뢰도 조사 및 이력”에 관한 연구가 수행되어졌다.

원자로 운전 년수의 증가에 따른 국내 원자력발전소의 소외 전원 상실사건에 대한 Database를 확립하기 위하여 위에서 언급한 두 가지 연구 결과 이외에도 다음과 같은 자료들을 수집하여 분석에 사용하였다.

- 원자력발전년보(1996년도 발행분까지)

- 원전 불시 정지 사례집 ('85년, '86년, '90년, '92년, '93년 발행분)
- '97, '98년도 불시 정지 목록
- 불시 정지 사건 상보

위의 자료를 토대로 하여 일단 소외 전원 상실로 분류될 수 있는 사건에 대해서는 해당 발전소의 "발전과장 일지"를 검토하고 또한 해당 발전소의 내부 문서 및 관련자의 면담을 통하여 사건 개요를 파악하였다. 원자로 운전 누적 연수 계산에서 각 발전소의 계획 예방 정비 기간은 제외하였다.

2.2 소외전원 상실 사건 분류

국내 원전의 소외 전원 상실 사건 유형에 대한 분류는 NSAC-103의 분류 기준을 참고하여 다음의 표 1에서 보는 바와 같이 분류하였다.

표 1. 국내 원전 소외 전원 상실 사건 분류 기준

유형	분류 기준
IA	30분 이상 모든 소외 전원 상실 및 발전소 정지 사건
IB	30분 이내 모든 소외 전원 상실 및 발전소 정지 사건
II	보조 소외 전원은 상실되었으나 발전소는 주 소외 전원에 연결되어 보조 변압기를 통하여 수전되는 사건
III	주 소외 전원 상실 및 발전소 정지, 그러나 발전소는 보조 소외 전원에서 자동이나 수동으로 연결되어 수전되는 사건
IV	발전소 정지시 소외 전원 상실

위의 분류 유형 중에서 IA 및 IB에 해당하는 사건이 사실상의 소외 전원 상실 사건(Total Loss of Off-Site Power Event)이다. IA에 속하는 사건은 30분 이상 모든 소외 전원이 상실된 사건으로 매우 심각한 상황으로 볼 수 있으며, 유형 IB는 모든 소외 전원 상실 사건은 발생하였지만 30분 이내에 소외 전원이 복구된 사건을 의미한다.

단기간 동안 지속된 소외 전원 상실을 분류하는 데는 세심한 주의를 필요로 한다. 보조 소외 전원이 살아 있고 주제어실에서 운전원에 의하여 보조 소외 전원으로의 연결이 가능한 경우에는 모든 소외 전원 상실 사건인 IB로 간주하지 않고 부분 소외 전원 상실사건인 사건 유형 II나 III으로 분류하였다. 이에 반해서 시간적으로 아주 짧은 기간이지만 운전원의 조치가 불가능한 모든 소외 전원 상실사건은 사건 유형 IB로 분류하였다.

사건 유형 II나 III은 부분 소외 전원 상실 사건(Partial Loss of Off-Site Power Event)으로 유형 II는 보조 소외 전원이나 기동 변압기를 통하여 들어오는 소외 전원은 상실되었지만 발전기는 정지하지 않고 소내 보조 변압기를 통하여 소내 부하를 담당하는 사건을 말한다. 사건 유형 III은 발전기는 정지하고 소내 보조 변압기를 통하여 공급되는 주 소외 전원은 상실되었지만 보조 소외 전원이 이용 가능하거나 기동 변압기를 통한 소외 전원 공급이 가능한 경우를 의미한다. 핵연료 재장전이나 정기 점검을 위한 저온 정지 운전모드에서 발생하는 모든 소외 전원 상실 사건은 사

건 유형 IV로 분류하였다.

2.3 소외전원 상실 사고 이력 조사

위에서 언급한 바와 같이 “고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 1단계 확률론적 안전성 평가” 및 “국내 원전 소외전원 상실사건 및 고리 3,4호기 비상 디젤 발전기 신뢰도 조사 및 이력” 연구에서 이미 1991년 12월 31일을 기준으로 국내에서 운전되던 가압경수로형 원전에 대한 소외 전원 상실 사고 빈도가 분석된 바 있다. 본 논문에서는 이들 연구 결과를 토대로 하여 새로이 상업운전을 시작한 영광 3,4호기를 포함한 10개 가압경수로형 원전에서 1992년 1월 이후 1998년 12월 말 사이에 발생한 소외 전원 상실 이력과 원자로 운전 누적 연수를 보완하여 새로운 “국내 가압경수로형 원전 소외 전원 상실 사고 빈도”를 확립하였다.

발전소 사고를 조사한 결과 1997년 1월 1일에 울진 2호기에서 영동 지방의 폭설로 인해 발행한 #1 송전선로 고장 1건만이 소외 전원 상실 사고로 분류되었을 뿐 더 이상의 소외 전원 상실 사건은 발생하지 않았다. 고리 1호기 상업운전 이후 1998년 12월 31일을 기준으로 한 국내 가압경수로형 원전의 소외 전원 상실 사고 이력을 표 2에 나타내었다.

표 2. 국내 가압경수로형 원전의 소외 전원 상실 사고 이력(1/2)

호기	발생일시	고장기간	유형	D/G 상태	사고 현황
고리 2	'87.7.16-11:39	38분	IA	D/G A,B 기동 성공, 154kV T/L 복구 후 정지	08시 51분 : 취수구의 BAND Screen A,B,D 고장 및 CW Pump B,D정지로 순환수계통 정상 운전 불가, 터빈 수동 정지(원자로 출력:20%, 터빈 출력:70MW)
					09시 30분 : 원자로 임계 도달
					10시 30분 : 발전소 재기동에 앞서 스위치야드의 섬락 현상이 심해짐에 따라 애자 청소를 위해 동 345kV #1,2 송전선로를 차단하고 154kV 북고 송전선로를 수전하여 소내전원을 공급받고 있음
					11시 39분 : 2호기 기동변압기 전단 B상154kV, 북고 송전선로의 피뢰기가 염해로 손상됨에 따라 모든 소외 전원 상실, 비상 D/G가 자동기동되어 안전관련계통에 전원 공급
					12시 18분 : 345kV #2 송전선로를 통해 수전하여 소내에 전원 공급
고리 2	'87.7.17-03:14	8분	IB	비상 D/G A,B 기동 성공	01시 40분 : BAND Screen A,B 및 피뢰기의 보수를 완료한 다음 섬락현상이 심해 수행되다 중단한 345kV #1,2 송전선로의 애자청소를 재개하기 위해 동선로를 차단하고 154kV 북고 송전선로를 통해 소내전원을 공급받고 있었음
					03시 14분 : 154kV 북고 송전선로 상실로 모든 소외전원 상실이 발생됨(현수 애자에서 염해에 의해 순간 섬락 현상 발생)

표 2. 국내 가압경수로형 원전의 소외 전원 상실 사고 이력(2/2)

호기	발생일시	고장기간	유형	D/G 상태	사고 현황
고리 4	'86.8.28-1551	7시간 40분	IA	비상 D/G A,B 기동 성공	15시 42분 : 태풍 베라의 영향으로 정기 보수 중이던 고리 3호기 기동용변압기 #1 피뢰기에 섬락 현상 발생
					15시 48분 : 기동용변압기 #2 피뢰기 섬락발생
					15시 51분 : 4호기 안전모선 A,B 소외전원 상실 중 주발전기 낙뢰발생으로 완전소외전원상실, 원자로 정지
					23시 28분 : 기동용변압기 #1 소외전원 복구
울진 2	'97.1.1-23:02	24분	IB	미확인	19시 32분 : 영동지방의 폭설과 강풍으로 울진-동해간 #1 송전선로 고장, 차단
					22시 58분 : 울진-동해간 #2 송전선로 고장
					23시 02분 : 울진-영주간 345kV 송전선로 #1,2 모두 송전탑 붕괴로 소외전원 상실, 1호기는 소내 부하운전 성공, 2호기는 실패
					23시 26분 : 울진-동해 #2 송전선로 가압
					04시 56분 : 계통 병입

2.4 가압경수로형 원자로 누적 운전 년수 계산

울진 3,4호기 PSA에 사용된 소외전원 상실 사고 빈도값은 원자로 운전 년수를 1991년 12월 31일을 기준으로 하여 계산된 값으로서 1991년 이후 상업 운전을 시작한 신규 원전을 포함하여 1998년 12월 31일까지 누적된 기존의 가동 원전에 대한 총 운전 년수에 대한 재계산을 수행하였다.

재계산 결과 1991년 12월 말 기준으로 총 48.8년에 불과하던 누적 운전 년수가 이의 약 2배인 95.8년으로 증가되었음을 알 수 있었다. 여기에는 '95년과 '96년에 새로이 상업 운전을 개시한 영광 3,4호기의 운전 년수가 포함되었다. 전 원전에 대해 계획 예방 정비 기간은 누적 운전 년수 계산에서 제외하였다. 표 3에 각 발전소에 대해서 상업 운전 개시 일로부터 1998년 12월 말까지의 원자로 운전 년수 계산 결과를 나타내었다.

2.5 소외전원 상실 사고 빈도 계산

국내 가압경수로형 원전의 총 누적 운전 년수와 소외전원 상실사고 회수를 이용하여 사고 발생 빈도값을 계산하였다. NSAC-103의 분류기준에 따라 국내의 소외전원 상실 이력을 분류한 결과 소외전원의 완전 상실에 해당하는 IA 및 IB에 해당하는 사고 발생 회수는 총 4회였다. 1991년 12월 말을 기준으로 분석한 결과는 고리 2호기에서 2회 고리 4호기에서 1회로 총 3회이었으나, 이후 1997년도에 울진 2호기에서 폭설과 강풍으로 인한 송전탑 붕괴로 1회가 추가되어 총 4회가 되었다. 그러나 고리 2호기에서 1987년 7월 16일과 17일에 연이어 발생한 소외전원 상실은 사고 이력을 분석한 결과 동일한 원인에 의해 발생한 것으로 1회의 사고로 간주하였다. 따라서 고리 1호기 상업 운전 이래 1998년 12월 말까지 국내 가압경수로형 원전에서 발생한 소외전원 상실사고 회수는 총 3회로 결정되었다.

표 3. 각 발전소별 원자로 운전 년수

호기	상업운전개시일	운전년수계산 기준일	총가동년수(년)	총 O/H 기간(년)	순운전년수(년)
고리 1호기	1978. 4. 29	1998. 12. 31	19,814	3,948	15,866
고리 2호기	1983. 7. 25		15,646	1,893	13,753
고리 3호기	1985. 9. 30		13,053	2,104	10,949
고리 4호기	1986. 4. 29		12,636	1,742	10,894
영광 1호기	1986. 8. 25		12,303	1,674	10,629
영광 2호기	1987. 6. 10		12,543	1,811	10,732
영광 3호기	1995. 3. 31		3,750	0,532	3,218
영광 4호기	1996. 1. 1		3,000	0,414	2,586
울진 1호기	1988. 9. 10		10,303	1,271	9,032
울진 2호기	1989. 9. 30		9,220	1,079	8,141
전체 발전소의 총 누적 운전 년수(년)			112,268	16,468	95.8

한편, 국내 가압경수로형 원전의 누적 운전 년수는 총 95.8년으로 이는 고리 1호기 상업 운전 개시 이래 총 10개 발전소의 총가동 년수 112,268년에서 계획 예방정비 기간 16,468년을 뺀 값이며, 따라서 국내 가압경수로형 원전의 소외전원 상실 빈도값은

$$\frac{3\text{회}}{95.8\text{년}} = 3.13 \times 10^{-2}\text{회/년}$$

으로 계산되었다. 이 값은 1991년도 12월 말 기준으로 한 6×10^{-2} 회/년보다도 약 50% 정도 개선된 값으로 나타났으며 이 결과는 국내 가압경수로형 원전의 내부사건에 의한 노심손상빈도 저감에 크게 기여를 할 것으로 기대된다.

한편, 미국의 경우에 소외전원 상실사고 빈도는 1995년 기준으로 4.6×10^{-2} 회/년로서 우리 나라 보다 다소 높은 값을 보이고 있는 것으로 나타났다. 국내 원전의 소외전원 상실사고 빈도 개선 효과 및 미국과의 비교 결과가 그림 1에 나타나 있다.

3. 결론

1991년 12월 말 기준으로 계산되어 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 확률론적 안전성 평가에 사용되어 오던 국내 가압경수로형 원전의 소외전원 상실빈도를 1998년 12월 말 기준으로 다시 계산하였다. 이를 위해 국내 원전의 불시정지 사례를 검토하고 그 중에서 소외전원 상실과 관련된 사건을 NSAC의 분류기준에 따라 분류한 결과 국내에서는 총 3회의 소외전원 상실사고가 있었던 것으로 나타났다. 기록 자료만으로 사건의 전개 과정 및 현황 파악이 미흡한 경우에는 해당 발전

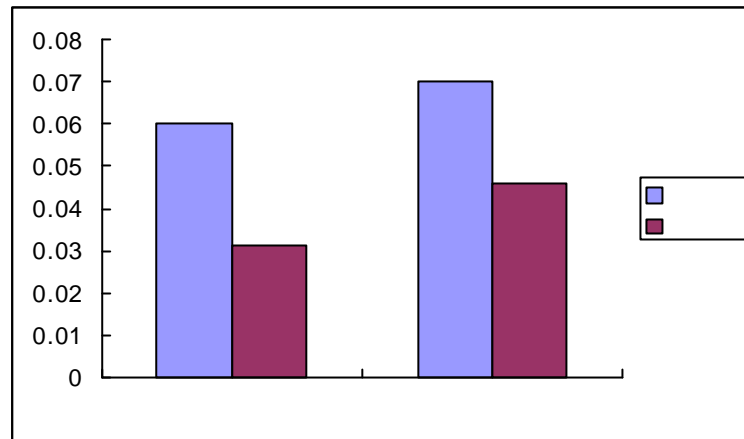


그림 1. 소외전원 상실빈도 개선 효과

소의 관련자와 면담을 통하여 자료의 신뢰성을 높였다. 국내 원전의 증가 및 운전 이력 증가에 따른 우리 나라 가압경수로형 원전의 총 누적 운전 년수도 1998년 12월 말 기준으로 다시 산정하였다. 분석 결과 국내 가압경수로형 원전의 소외전원 상실빈도는 1991년 12월 말을 기준으로 한 6×10^{-2} 회/년 보다도 약 50% 정도 개선된 3.13×10^{-2} 회/년으로 나타났다. 이 값은 1995년을 기준으로 한 미국의 소외전원 상실빈도 4.6×10^{-2} 회/년 보다도 약간 낮은 것으로 나타났다. 새로이 개선된 값은 현재 진행 중인 영광 5,6호기와 울진 5,6호기 확률론적 안전성 평가의 최종 노심손상빈도 정량화에 사용되었으며, 향후 가동원전의 확률론적 안전성 평가에도 국내 고유 데이터로서 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

참고자료

1. 고리 3,4/영광 1,2호기 확률론적 안전성 평가, 한국전력공사, 1993
2. 국내 원전 소외전원 상실사건 및 고리 3,4호기 비상 디젤발전기 신뢰도 조사 및 분석, 한국원자력연구소, 1993
3. NSAC-103, Loss of Off-Site at clear Power Plants : All Year Through 1985, EPRI, 1986
4. NUREG/CR-5750, Rates of Initiating Events at US Nuclear Power Plants : 1987-1995, NRC, 1998