

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

고리 3,4/ 영광 1,2호기 원자로보호계통 및 공학적안전설비작동계통
AOT/STI 변화에 따른 위험도평가

RPS/ESFAS Tech. Spec. Optimization Study for Kori Units 3,4 &
Yonggwang Units 1,2

조성환,김명기,권종주,서미로,정백순

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 원자로보호계통 및 공학적안전설비작동계통의 정기점검주기와 허용정지시간에 대하여 확률론적안전성평가 기술을 도입하여 정기점검주기와 허용정지시간 변화에 따른 위험도를 평가하고 이를 효과적으로 분석하여 합리적인 원자력 발전소 운영방안을 도출하고자 하였다.

이를 위하여 RPS계통의 17개 원자로정지신호에 대한 정점사건을 구성하여 고장수목을 작성하였고 ESFAS계통에 대하여는 11개의 안전설비작동신호에 대한 정점사상을 구성하여 고장수목을 작성하였다. 또한 해당발전소의 고유신뢰도 데이터베이스를 개발하고 계통의 카드 및 부품수준까지의 상세 고장수목을 구성하여 신뢰도 및 위험도를 분석 하였다.

논리캐비닛과 주/부계전기에 대하여 시험시는 4시간, 정비시는 12시간의 AOT를 할당하고 아날로그 채널의 AOT 는 시험시 4시간, 정비시 6시간을 할당하고 3개월의 STI를 반영하여 노심손상빈도를 계산한 결과 고리 3,4호기의 경우 CDF가 7.930E-5에서 8.046E-5으로 변화하여 Δ CDF가 +1.16E-6으로 나타났다. 또한 영광 1,2호기의 경우는 CDF가 6.780E-5에서 6.861E-5으로 변화하여 Δ CDF가 +8.1E-7로 나타났다.

Abstract

To justify the AOTs/STIs of RPS/ESFAS in Technical Specifications of Kori units 3,4 and Yonggwang units 1,2, the Probabilistic Safety Assessment technology was performed. The risk variation with the changing of AOTs/STIs were analysed and the reasonable AOTs/STIs are suggested in this paper.

To quantify the total risk impact on plant and the reliability on system, the new top events for 17 reactor trip signal and 11 engineered safety feature actuation system signal were defined and composed in fault tree. The specific databases were developed for each plant and the detailed fault tree to the level of electronic cards and electronic components were drawn up.

The results showed that the Δ CDF is $+1.16E-6$ for Kori unit 3,4 and $+8.1E-7$ for Yonggwang units 1,2 from the base CDF of $7.930E-5$ for Kori units 3,4 and $6.780E-5$ for Yonggwang units 1,2

1. 서 론

운영기술지침서(Technical Specification, TS)에 명시되어 있는 정기점검시험주기(Surveillance Test Interval, STI)는 주요안전계통의 성능확인 및 품질보증을 위하여 정기적으로 시험이 수행되어야하는 최소주기를 나타내며 허용정지시간(Allowed Outage Time, AOT)은 원자로가 운전중에 대기상태로 있는 계통을 점검 또는 보수시 허용되는 최대시간을 나타내고 있다. 이에 따라 원자력발전소에서는 운영기술지침서에 표시되어 있는 계통에 대한 정기점검 및 정비 계획을 수립하여 이를 수행하고 있다. 그러나 이러한 AOT 및 STI는 공학적판단에 기반을 두고 책정된 것으로 이러한 활동의 수행으로 인한 위험도의 영향평가가 정량적으로 분석되어 있지 않은 실정이다. 또한 빈번한 정기점검으로 야기되는 인적 실수 및 경년열화로 인한 발전소의 불시정지사례가 증가하고 있으며 과도하게 책정된 정기점검주기로 인하여 이에 투입되는 인적, 물적 자원이 적절히 배분이 되는가에 대한 평가가 요구되고 있다. 이에 따라 원자력발전소에서 가장 부담이 되는 시험으로 현장에서 개선을 요구하고 있는 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 원자로보호계통(Reactor Protection System, RPS)및 공학적안전설비작동계통(Engineered Safety Feature Actuation System, ESFAS)에 대한 AOT 및 STI에 대하여 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)

기술을 도입하여 AOT 및 STI를 변화시켜 가며 이에 따른 위험도를 계산하고 효과를 분석하여 합리적인 원자력 발전소 운영방안을 도출하고자 하였다.

분석대상 계통의 정기점검 방법 및 시험내용이 조사되었고 정기점검이 발전소 안전성에 미치는 정성적, 정량적 평가와 운영성에 미치는 영향이 조사되었다. 각 시험항목의 AOT 및 STI 변화시의 위험도 영향평가를 위하여 원자로보호계통(RPS)의 17개 원자로정지신호에 대한 정점사건을 구성하여 고장수목을 작성하였고 공학적안전설비작동계통(ESFAS)은 11개의 안전설비작동신호에 대한 정점사상을 구성하여 고장수목을 작성하였다. 또한 해당발전소의 고유신뢰도데이터베이스를 개발하고 계통의 카드 및 부품수준까지의 상세 고장수목을 구성하여 신뢰도 및 위험도를 분석하였다. 마지막으로 원자력발전소 계속제어계통의 신뢰도향상을 위하여 현장에서 수행되고 있는 프로그램에 대한 정성적 평가를 수행하였고 이에 따라 최종 분석결과를 도출하였다.

2. 본 론

2.1 RPS/ESFAS 정기점검 시험 개요

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 주요안전계통으로 대표되는 RPS 및 ESFAS는 아날로그 채널(감지기, 바이스테블 등), 반도체 논리보호계통 회로, 주/부계전기 및 원자로정지차단기 등으로 구성되어 있다. 이 계통의 정기점검 시험은 시험스위치를 시험위치에 놓거나 우회정지 차단기를 닫거나, 반도체 논리보호계통 회로 보드를 제거하여 경보신호를 제어반에 발생시킴으로서 수행된다. 한 계열이 시험중일 때는 다른 계열은 정상운전모드에 있어야 하며, 두 트레인을 동시에 시험할 수는 없다. 또한 RPS/ESFAS를 구성하고 있는 부계통의 STI/AOT는 계통별로 각각 다르게 규정되어 있다. 이러한 정기점검 특성에 따라 위험도는 AOT 및 STI에 따라 변화하게 되며 시험시 인적실수나 기기의 오동작으로 야기되는 발전소불시정지의 발생가능성이 있으므로 이에 따른 위험도도 증가하게 된다.

계통별 정기점검시험의 종류는 1)아날로그채널 시험 2)반도체논리 시험 3)주/부계전기 시험 4)원자로정지차단기 시험으로 크게 나눌 수 있다. 아날로그 채널시험은 발전소가 정지중일 때 뿐만 아니라 정상 운전중 예도 시험할 수 있다. 발전소 운전중에 수행되는 아날로그 채널의 시험모드는 각 해당회로의 설계특성에 따라 트립 또는 우회모드로 수행된다. 트립모드로 수행되는 아날로그 채널의 시험은 시험중인 해당 채널에 트립조건이 발생되어 있어서 시험중에 다른 채널에서 단지 한 개의 트립신호라도 발생하면 원자로보호계통이 작동

하게 된다. 우회모드에서 수행되는 아날로그채널의 시험은 시험되는 채널에서 트립조건이 발생되어 있지 않으므로 시험이 수행되지 않는 나머지 채널에서 트립신호 발생을 위한 논리 구성이 이루어져야 만이 원자로보호계통이 작동하게 된다.

반도체논리(SSPS) 시험은 트립신호발생을 위한 반도체논리 캐비닛 내의 각 기기의 건전성을 확인하고, 정상적인 트립논리 구성과 신호의 연속성을 확인하는 데에 있으며 발전소가 정지중일 때 뿐만 아니라 정상운전 중에도 시험할 수 있으며, 각 트레인 내에 설치되어 있는 반자동 시험 패널을 이용하여 시험이 수행된다. 주계전기 시험은 논리시험의 일부로서 논리회로에서부터 주계전기 코일까지, 부계전기 시험은 출력계전기 시험반에서 주계전기 코일로부터 부계전기 코일까지 전송되는 신호의 연속성 및 코일의 접점 개폐와 여자 상태를 점검한다. 원자로정지차단기는 정상운전시에는 사용되는 2개의 원자로비상정지차단기와 2개의 우회 차단기로 구성되어 있다. 정상 운전시에는 2개의 비상 정지차단기가 투입되어 사용되고 있으나 비상정지 차단기의 시험 및 정비시에는 우회차단기가 비상정지 차단기를 대신하여 투입된다.

2.2 정기점검이 발전소 안전성 및 운전성에 미치는 영향

정기점검은 기기의 운전성을 확인하기 위하여 수행된다. 일반적으로 정기점검을 수행함으로써 기기의 고장 혹은 성능저하 상태를 빨리 인식할 수 있어 기기의 고장으로 인한 이용불능도를 낮추게 된다. 그러나 기기의 총체적 이용불능도를 계산할 때는 기기고장으로 인한 이용불능도 외에 시험 및 정비로 인하여 기기가 운전이 불가능한 경우도 고려하여야 하므로 막연히 책정된 AOT/STI가 항상 이용불능도를 감소시킨다고 볼 수는 없다. 또한 정기점검후 인적오류로 인하여 기기를 정상상태로 회복시키지 못할 가능성도 고장수목에 인간오류계산을 통해 반영시켜야 되므로 이 또한 이용불능도를 증가시키는 요인이 되며 기기의 경년열화나 마모의 과정을 통하여 기기의 성능저하를 초래할 수도 있다. AOT가 너무 짧을시 시험 및 정비에 허용된 시간이 짧아 충분한 시험 및 정비를 수행하지 못할 경우도 기기고장율을 증가시켜 신뢰도를 저하시킬 수 있다. 또한 정기점검 기간동안 원자로가 불시정지될 가능성이 있으며 특히 계측설비의 경우는 점검중인 계열은 트립모드로 놓고 점검 또는 시험을 수행하기 때문에 다른 계열에서의 기기고장 또는 오동작이 발생할 경우 원자로 정지논리가 성립되어 바로 원자로 정지신호가 발생되기 때문에 더욱 주의를 요하게 되며 실제로 국내 및 해외에서도 정기점검중 인적실수 및 기기 오동작으로 인한 발전소 불시정지 사례가 빈번하게 발생하고 있어 이로 인한 발전소 위험도는 증가하는 것으로 분석되고 있

다. 현행 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 운영기술지침서의 RPS 및 ESFAS AOT는 아날로그 채널 시험에 2시간, 정비에 1시간을 규정하고 있으며 논리캐비넷, 주/부계전기, 원자로정지차단기 시험에 2시간 정비에 6시간을 규정하고 있다. 현 요건하에서 RPS/ESFAS에 대한 시험은 발전소별 월간 17번정도 수행하고 있으며 한 시험에 3-4명이 5시간정도의 시간을 사용하므로 발전소당 297.5인.시간/월의 인력이 소요되고 있으며 방사선 구역에서의 정기점검 수행시 방사선 피폭으로 인한 영향도 큰 부담으로 작용하고 있다.

2.3 AOT/STI 변화에 따른 위험도의 정량적 평가

정기점검주기 변화에 따른 발전소의 위험도를 평가하기 위하여 PSA기법을 도입하여 노심손상빈도를 계산 하였다. 고장수목에 고려된 이용불능도에는 Random고장에 의한 이용불능도, 시험 및 정비에 의한 이용불능도, 공통원인에 의한 이용불능도가 고려되고 있으며 정기점검주기는 시험 및 정비에 의한 이용불능도에 영향을 미친다. 또한 대상 계통의 정기점검이 아나로그채널, 논리캐비넷, 정지차단기, 주계전기, 부계전기로 나뉘어 각각 다른 시험요건이 적용되므로 기존의 기기단위로 분석을 수행했던 PSA 고장수목으로는 정기점검주기 변화에 따른 영향을 분석하지 못하므로 본 연구에서는 카드레벨까지 범위를 확대하여 분석을 수행 하였다.

RPS/ESFAS에 대한 고장수목 구성은 RPS의 경우 17개의 원자로정지신호에 대한 정점사건을 정의하여 이들에 대한 고장수목을 구성하였으며, ESFAS의 경우에는 11개의 안전설비 작동신호에 대한 정점사건을 정의하여 고장수목을 구성 하였다. 계통이용불능도의 정량화를 위하여는 고장수목에 모델링된 각 부품의 신뢰도 데이터베이스가 필요하다. 본 연구에서는 고리 3,4호기와 영광 1,2호기의 고유 고장데이터를 조사하여 일반데이터베이스와 베이지안합성을 통하여 해당 발전소 고유의 신뢰도 데이터베이스를 구축하여 이용하였다. 그러나 정지차단기와 논리캐비넷의 신뢰도 데이터는 일반 데이터베이스를 그대로 사용 하였다. 그 이유는 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기에서 부품단위 고장을 산출을 위한 정보를 획득할 수가 없었으며 정지차단기의 경우는 정지 요구 횟수가 적어 고유데이터 개발에 적합하지 않았기 때문이다. 표 2.3-1 에 고리 3,4호기 고유 기기고장 데이터베이스를 예시 하였다.

RPS/ESFAS계통에 대한 상세 고장수목 및 조사된 고유데이터베이스를 가지고 각 사건수목에 대하여 노심손상빈도를 정량화 하였다. 최적의 시험주기, 시험시간, 정비시간을 구하고자 표 2.3-2에 나타낸 것과 같이 각 시험항목에 대한 시험주기,시험시간,정비시간을 세분하고 각기 다른 값을 할당하여 각각의 노심손상빈도를 정량화 하였고 표 2.3-3에 각 경우에

대한 정량화 결과가 표시되어 있다. 고리 3,4호기의 경우 현행요건에서의 CDF가 $7.930E-5/R\bar{Y}$ 이며 Case 1에서는 CDF가 $8.086E-5/R\bar{Y}$ 로 147%의 증가율을 보이고 있고 Case 2에서는 $8.086E-5/R\bar{Y}$ 로 증가하여 197%의 증가율을 보이고 있다. Case 1의 경우는 아나로그 채널의 시험주기를 1개월에서 3개월로 늘리고 정지차단기를 제외한 아나로그채널, 논리캐비넷,주계전기,부계전기의 시험시간을 현행요건인 2시간에서 4시간으로, 정비시간을 아나로그 채널의 경우는 1시간에서 6시간으로 기타 다른 항목은 6시간에서 12시간으로 연장시킨 값을 반영하여 노심손상빈도를 계산한 결과이다. 원자로정지차단기는 발전소 위험도에 미치는 영향이 클 것으로 예상되어 현행 AOT 및 STI요건을 그대로 유지하는 것으로 계산하였다. .

2.4 신뢰도향상을 위하여 현장에서 수행되고 있는 프로그램에 대한 정성적 평가

STI 연장은 계통 시험주기 증가로 인하여 해당계통의 고장상태 인식이 늦어지므로 시험과 시험 사이의 계통 고장에 따른 계통 이용불능도를 증가시킨다. 그러나 이러한 고장율을 감소시키기 위한 각종 예방정비활동을 통하여 고장부품의 교체율이 줄어들고 있음을 확인했다. 이러한 예방정비 프로그램으로는 전자회로기판관리 프로그램, 전기회로기판 육안검사 및 성능시험(ICT:In Circuit Test), 기능시험 등이 있다. 표 2-4에서 92년부터 95년까지 고리 3,4 및 영광 1,2호기 RPS/ESFAS 관련 전자회로 기판에 대한 부품 교체율을 나타내었다. 이 표를 관찰해 보면 현장에서 수행되고 있는 각종예방정비 프로그램으로 인하여 계속제어 계통의 신뢰도가 향상되고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 RPS/ESFAS 계통에 대한 현행 AOT 및 STI 요건의 안전성 저해요인 및 이에 따른 개선 필요성에 따라 해외 개선사례 및 현행 시험/정비 소요시간에 근거하여 고리 3,4 호기 및 영광 1,2호기의 RPS/ESFAS 계통의 AOT/STI 변화에 따른 위험도를 정량적으로 평가하였다. 표 2.3-3의 Case 1, 2, 3 노심손상빈도는 AOT 와 STI를 연장함에 따른 인적오류감소는 반영하지 않은 결과이며 예방정비 절차를 통한 계속기의 신뢰도 향상효과 또한 정량적으로 반영하지 않고 계산한 결과이므로 극히 보수적으로 계산한 결과라 할 수 있다. Case 1의 노심손상빈도는 논리캐비넷과 주/부계전기에 대하여 시험시 4시간, 정비시

12시간의 AOT를 가정하였고 아날로그 채널의 AOT 는 시험시 4시간, 정비시 6시간의 가정과 3개월의 STI를 반영하여 정량적으로 계산한 결과이다. 이 경우 고리 3,4호기는 CDF가 $7.930E-5$ 에서 $8.046E-5$ 로 변화하여 Δ CDF가 $+1.16E-6$ 이며 영광 1,2호기의 경우 CDF가 $6.780E-5$ 에서 $6.861E-5$ 로 변화하여 Δ CDF가 $+8.1E-7$ 로 나타났다 이를 Reg. Guide 1.174(An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions On Plant-Specific Changes to the Licensing Basis)에서 제시하고 있는 Acceptance Guidelines for CDF와 비교할 경우 고리 3,4호기는 Region 2에 해당하며 영광 1,2호기는 Region 3에 해당하는 것으로 나타났다. 최종 정량과 결과 및 계측제어계통의 신뢰도 확보를 위해 수행되고 있는 프로그램의 효과를 고려하여 표 2.3-3의 Case 1의 경우가 원자로의 안전성에 제일 영향을 작게 미치며 발전소의 운영측면에도 많은 긍정적 효과를 보이는 것으로 나타나 이를 고리 3,4 /영광 1,2호기의 RPS/ESFAS계통의 AOT 와 STI로 변경하는 것이 가장 타당한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 고리 3,4/영광 1,2호기 원자로보호계통 및 공학적안전설비 정기점검 요건완화연구, '99전력연-단358, 한국전력공사 전력연구원,1999.8
2. Jansen R.L et al., "Evaluation of Surveillance Frequency and Out-of-Service Times for the Reactor Protection Instrumentation System", WCAP-10271, Westinghouse, 1983.1
3. Jansen R.L et al., "Evaluation of Surveillance Frequency and Out-of-Service Times for the Reactor Protection Instrumentation System", WCAP-10271-P-A, Westinghouse, 1986.5
4. Andre, G.R et al., "Evaluation of Surveillance Frequency and Out-of-Service Times for the Engineered Safety Features Actuation System", WCAP-10271-P-A, Supplement 2, Revision 1, Westinghouse, 1986.5
5. Andre, G.R et al., "Probabilistic Risk Analysis of the RPS/ESFAS Test Times and Completion Times", WCAP-14333-P, Supplement 2, Revision 1, Westinghouse, 1986.5

표 2.3-1 고리3,4 호기 공유 데이터베이스

부품명	일반개이라 고장률 (/hr)	고장 개이라			고유개이라 고장률 (/hr)	비고
		고장 횟수	기기운전 시간(hr)	고장률		
Pressure Transmitter	2.81E-06	2	2,846,558	3.51E-07	9.67E-07	
RTD Sensor	8.60E-06	2	1,552,668	1.28E-06	2.02E-06	
Level Transmitter	4.90E-06	7	2,975,947	2.35E-06	2.45E-06	
Channel Test Card	1.70E-07	1	10,481,509	9.54E-08	1.11E-07	
Relay Card	7.80E-07	1	2,587,780	3.85E-07	4.78E-07	
Flow Transmitter	2.00E-06	0	1,164,501	8.59E-07	1.13E-06	주 1)
Master Relay	5.22E-07	1	2,846,558	3.51E-07	3.79E-07	
Slave Relay	5.18E-07	0	6,340,061	1.58E-07	2.39E-07	주 1)
Ion Chamber	1.44E-05	4	1,283,890	3.03E-06	3.85E-06	주 1)

주 1) : 고장횟수 0인 경우 1이라고 가정

표 2.3-2 FPS 및 ESFAS의 AOT/STI 개선안

상 유	현행 요건	Case 1	Case 2	Case 3
○ 이발프크레브				
- 시험주기(개월)	1	3	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	12	8
- 정비주기(개월)	24	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	1	6	72	24
○ 논리케비넌				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	18	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18
○ 정지치단기				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	<-	<-	<-
- 정비주기(개월)	12	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	<-	<-	<-
○ 주계전기				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	고장률	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18
○ 부계전기				
- 시험주기(개월)	3	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	고장률	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18

표 2.3-3 고리3,4 호기 및 영광 1,2호기 위험도 분석결과

발원소	고리 3, 4 호기		영광 1, 2 호기		W (2/4 Logic)		W 2/3 Logic	
	CDF (/yr)	중기률 (%)	CDF (/yr)	중기률 (%)	CDF (/yr)	중기률 (%)	CDF (/yr)	중기률 (%)
현행요건	7.93E-06	-	6.78E-06	-	5.70E-06	-	5.71E-06	-
Case 1	8.04E-06	1.47	6.85E-06	1.19	5.80E-06	1.6	5.83E-06	2.0
Case 2	8.08E-06	1.97	6.89E-06	1.53	5.83E-06	2.3	5.83E-06	3.1
Case 3	8.05E-06	1.67	6.87E-06	1.32	-	-	-	-

주) 1. CDF : Core Damage Frequency

2. W 2/4 Logic : W 정 발원소 2/4 논리 임력신호 계산결과

3. W 2/3 Logic : W 정 발원소 2/3 논리 임력신호 계산결과

표 2.4 ICT에 의한 부품교체율(고리 3,4 /영광 1,2)

수 행 년 도	1992	1993	1994	1995
부품교체율	0.60 %	0.20 %	0.18%	0.11%