'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

IRRAS를 사용한 최적 허용정지시간 및 점검주기 평가체계 개발

양희창, 정창현
서울대학교

제무성
한성대학교

신원기
한국원자력안전기술원

요 약

원자력발전소의 기기들에 대한 허용정지시간과 점검주기는 운영기술지침서(Technical Specification)에 명시되어 있는데 점검주기가 짧은 기기의 잦은 점검은 손상부품의 교체를 통하여 발전소의 불이용도를 감소시키는 효과가 있는 반면 점검원의 부담을 늘려 보수시 인적오류의 증가로 인한 불이용도 증가의 가능성이 있다. 본연구에서는 기기의 허용정지시간과 점검주기를 변화시켜 계통의 불이용도를 IRRAS 5.0을 이용하여 허용정지시간과 점검주기의 변화가 계통의 불이용도에 미치는 영향을 분석하는 평가체계를 개발하고 영광 3,4호기 보조급수계통에 적용하였다.

1. 서론

원자력발전소 운영기술지침서(Technical Specification)에서 규정하는 조건들중에서 중요한 두가지의 운전제한조건(*LCO: Limiting Conditions for Operation*)은 허용정지시간(*AOT*: Allowed Outage Time) 및 점검주기(STI: Surveillance Test Interval)이다. 허용정지시간은 원자로 가동중 이용불능 상태의 안전계통을 수리할 수 있는 최대 허용기간으로서 이 기간중에 해당 안전계통이 제대로 수리되지 못할 경우 운전정지를 하여야 한다. 점검주기는 원전의 주요 안전 계통들의 시험이 주기적으로 실시되어야 하는 최소시간주기를 의미한다.

현행 원자력발전소 운영기술지침서에서 규정된 허용정지시간 및 점검주기는 주로 결정론적인 관점과 공학적 판단, 그리고 전문가적 견해에 의해 결정되어 있기 때문에 현행 운영기술지침서에서 요구하는 빈번한 점검과 시험은 인간실수 유발 및 발전소 안전성, 경제성을 저하를 야기시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 확률론적 안전성 분석(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 방법론에 기초한 위험도 기준 시스템 불이용도 계산을 통하여 최적 AOT 및 STI 평가 방법론을 제시하고자 한다.

본 논문의 대상으로는 영광 3,4호기의 보조급수 계통(Auxiliary Feedwater System: AFWS)을 예제 시스템으로 사용하였으며, 고장수목 분석을 통해 계통의 불이용도를 미국 INEL에서 개발한 IRRAS (Integrated Risk and Reliability Analysis System) 5.0 code로 계산하여 최적 AOT 및 STI 평가의 지표로 사용하였다.

2. 본론

2.1 영광 3,4 호기 보조급수계통

원자력발전소의 보조급수계통(Auxiliary Feedwater System)은 공학적 안전설비(Engineered Safety Feature) 계통에 속해 있으며 주급수 공급이 상실될 경우 증기발생기에 이차측 보충수(Secondary Quality Makeup Water)를 공급하는 기능을 수행한다.

보조급수 계통의 주된 기능은 다음과 같다.

A. 주급수계통이 동작불능이거나 고장으로 사용할 수 없을 경우 Hot Standby Condition 동안 증기발생기의 수위를 유지한다.

B. 예상되는 모든 사고발생시 주급수 계통의 급수 기능이 상실되었을 때 노심냉각계통(Reactor Coolant System: RCS)의 온도와 압력이 정지냉각계통(Shutdown Cooling System: SCS)의 가동을 허용하는 값까지 상승했을 경우 RCS 에서 붕괴열을 제거하는 기능을 한다.

보조급수계통은 두개의 100% 용량을 가지는 Train 으로 구성되며 각 Train 은 50% 용량을 가지는 모터구동펌프 1 기, 디젤구동펌프 1 기와 그와 연관되는 밸브, 파이핑, 계측장비와 제어장비로 구성된다. 보조급수계통의 구성은 그림 1 에 간략화시켜 도시하였다. 각 Train 은 증기발생기 A 와 B 로 급수할 수 있으며 보조급수펌프는 정상 운전시 대기 상태(Standby Mode)에 있다. 보조급수 구동 신호(Auxiliary Feedwater Actuation Signals: AFAS)는 펌프들을 구동시키며 경보는 주제어실(Main Control Room: MCR)에서 펌프의 자동구동과 자동비상정지 기능을 위해 주어진다. 모터구동펌프와 디젤구동펌프는 낮은 흡입압력에서 자동정지된다.

보조급수계통은 해당 증기발생기의 수위가 낮아졌을 때 자동적으로 구동되거나 주제어실의 수동 조작에 의해 발생되는 보조급수 구동신호에 의해 자동적으로 구동된다. 보조급수계통은 증기발생기로 통하는 유동경로상의 4 기의 독립적인 펌프가 정상 운전시 작동 가능해야 한다는 운영기술지침에 명시된 제한조건에 따라 동작되어야 한다. 만일 하나의 보조급수펌프가 작동불능일 경우 72 시간내에 동작 가능한 상태로 회복되거나 그 다음 6 시간내에, 발전소가 Hot Standby 상태가 되어야 하고 다음 6 시간 내에 Hot Shutdown 조치가 취해져야 한다. 3 기 혹은 4 기의 보조급수 펌프가 실패했을 경우에는 적어도 2 기의 펌프를 정상적인 동작이 가능한 상태로 회복시킬 수 있는 조치가 즉시 취해져야 한다.

본논문의 보조급수계통 불이용도 계산에 사용된 고장수목은 참고문헌 [1]를 기초로 수정보완하여 모델링하였으며 보조급수계통에 대한 기본 사례(Base Case)의 경우를 고려하였다. 보조급수계통의 고장수목은 그림 1 에서와 같이 Train A, B 의 유량이 동시에 부족한 경우, 즉 50% 용량의 펌프 4 기중 3 기 이상이 실패하는 경우를 계통실패로 가정하는 2/4 계통으로 규정할 수 있다. 보조급수계통에 대한 고장수목은 전력계통, 공학적 안전설비계통, 계측계통 등과 TRANSIT gate 를 통해 연결시켜 모델링하였다.

2.2. 최적 허용정지시간 및 점검주기 평가 체계

본논문의 목표는 보조급수계통을 대상으로 서로 다른 허용정지시간과 점검주기를 변화시켜서 계통 불이용도를 계산함으로써 계통불이용도값이 최저가 되는 허용정지시간과 점검주기를 찾아내는데 있다. 최적 허용정지시간 및 점검주기 평가의 지표로는 계통의 불이용도를 사용하였으며 불이용도 계산을 위한 작업은 다음 두 단계로 구성된다. 첫단계는 보조급수계통의 기기중 허용정지시간과 점검주기 변경 대상 기기의 선정이고, 두번째

단계는 기기의 허용정지시간과 점검주기의 변화에 따른 계통불이용도의 계산이다.

본논문의 계통 불이용도 계산에 사용된 고장수목은 두 Train 의 유량이 부족한 경우를 실패(Top Event)로 가정한 논리에 근거하고 기기의 허용정지시간과 점검주기의 변화가 보조급수계통의 전체 불이용도에 기여도가 큰 기기여야 하기 때문에 대상 기기는 보조급수계통 TRAIN-A 의 모터구동펌프 MDP001PA 와 디젤구동펌프 DDP002PA 를 선정하였다. 그리고 모터구동펌프와 디젤구동펌프는 같은 Train 에 위치하고 있기 때문에 두 펌프에 대해 동시에 허용정지시간과 점검주기변화를 적용했다.

허용정지시간은 각각 12, 24, 72, 168 시간으로 변화시켰으며 점검주기는 168, 360, 720, 1080, 1440, 2160 시간으로 변화시켜 계통의 불이용도를 계산했다. 위의 허용정지시간과 점검주기 변경계획에 따른 보조급수계통의 불이용도계산에는 위에서 전술한 IRRAS 5.0 을 사용하였다. 변경된 기기의 허용정지시간과 점검주기는 수계산에 의한 기기의 불이용도값의 변화의 형태로 IRRAS code 상에 반영되었으며 불이용도계산에는 하나의 기기를 대상으로한 참고문헌[2]의 계산 모델을 사용하였다. 본논문에서는 기기의 점검과 보수, 공통원인고장, 동작 요구시 고장, 기기 동작시 고장이 기기의 불이용도에 영향을 준다고 가정하였으며 이 계산모델은 다음과 같다.

$$q_{av} = \frac{\tau_r}{\tau} + q_{S,CCF} + q_{R,CCF} + Q_0 + \frac{1}{2}\lambda\tau \qquad (1)$$

$\frac{\tau_r}{\tau}$ = 점검과 보수로 인한 기여도

$q_{S,CCF}$ = 동작요구시 공통원인고장으로 인한 기여도

$q_{R,CCF}$ = 동작시 공통원인고장으로 인한 기여도

Q_0 = 동작요구시 고장으로 인한 기여도

$\frac{1}{2}\lambda\tau$ = 동작시 고장으로 인한 기여도

식(1)의 우변 첫항은 시험과 보수로 인한 기기의 불이용도를 반영한 항이며 τ 는 점검주기를, τ_r 은 시험기간을 각각 의미한다. 본논문에서는 점검이나 보수작업동안 기기는 사용할 수 없다는 가정하에 보수적으로 τ_r 을 허용정지시간으로 가정했다. 식(1) 우변의 두번째, 세번째 항은 각각 동작요구시 공통원인고장 확률, 동작시 공통원인고장 확률을 의미하고 네번째 항은 동작 요구시 고장 확률을 의미하며 마지막 항은 시험기간 τ_r 동안의 동작시 고장 확률을 의미한다.

기기의 공통원인고장이 계통의 불이용도에 미치는 영향은 허용정지시간과 점검주기의 변화에 따라 변할 것이나 허용정지시간과 점검주기의 변화가 계통의 불이용도에 미치는 영향만을 파악하기 위해서 공통원인고장에 관한 확률 값은 상수로 일정하다고 가정하였다. 공통원인고장 확률과 동작요구시 고장 확률, 실패율 λ 는 참고문헌 [1]에 제시된 값을 사용하였다.

각 항들은 계통불이용도계산을 위한 허용정지시간 및 점검주기 변경 Matrix 에 따라 수계산으로 계산하여 고장수목 상의 기본사건(Basic Event)의 확률값의 형태로 입력되었으며 사용된 공통원인고장과 동작요구시 고장 확률값을 표 1 에 제시하였다.

최종적으로 최적 허용정지시간과 점검주기 평가를 위한 체계를 정리하면 다음과 같다.

(1) 허용정지시간 및 점검주기 변경대상 계통/기기 선정

(2) 변경 허용정지시간 및 허용정지시간 Matrix 작성

(3) 대상 계통의 고장수목 모델링

(4) 변경 Matrix 에 따른 기기의 평균 불이용도 계산
(5) IRRAS code 상에서 고장수목의 기본사건 확률값 입력 및 계통 불이용도 계산
(6) 계산된 불이용도 분석
(7) 최적 허용정지시간 및 점검주기 평가

2.3. 결과

모터구동펌프 MDP001P 와 디젤구동펌프 DDP002P 에 대하여 변경된 허용정지시간과 점검주기에 대한 보조급수계통의 불이용도값은 참고문헌[1]의 보조급수계통 고장수목과 실패 자료를 사용해 IRRAS 5.0 으로 계산했고 그 결과를 그림 2 에 나타내었다. 운영기술지침서에 명시되어 있는 보조급수펌프에 대한 현행 허용정지시간 72 시간의 경우 점검주기가 1080 시간 (45 일)이 될 때까지 보조급수계통의 불이용도는 감소하고 그 이후로는 불이용도가 증가하였다. 이 결과에서 현행 점검주기를 1 달(30 일)에서 45 일로 연장시킬 경우 보조급수계통의 불이용도는 약 4.0% 감소하고, 2 개월로 연장시킬 경우에는 3.4% 증가, 3 개월로 연장시킬 경우에는 9.1% 증가한다. 또한 허용정지시간이 증가할수록 같은 점검주기에 대해 보조급수계통의 불이용도는 증가하는 것으로 나타났다. 허용정지시간과 점검주기의 변화에 따르는 계산된 보조급수계통의 불이용도값은 표 2 에 나타내었다.

3. 결론

본연구에서는 복잡한 계통에 대한 최적 허용정지시간 및 점검주기 평가체계를 세우고 IRRAS 5.0 을 사용하여 수립된 평가체계의 적용사례를 보여주었다. 이 평가체계는 어떤 계통/부품에 대해서도 적용가능한 매우 유연한 방법으로서 위험도 기준 규제(Risk-based Regulation)가 개발되기 전에 본 체계가 활용됨으로써 위험도 기준 규제 개발에 기여할 수 있다.

현재 운전중인 원전중 영광 3,4 호기 보조급수펌프에 대한 점검주기는 1 개월로 현행 기술지침서에 명기되어 있다. 그러나 1992 년도에 미국에서 수행된 기술지침서 점검요건 개선연구에서는 잦은 점검으로 인한 역효과(Adverse Effect)를 고려하여 점검주기를 3 개월로 변경할 것을 권고하고 있다[3]. 본연구의 보조급수계통 불이용도 계산에 따르면 현행 허용정지시간 72 시간 하에서는 점검주기를 1 개월에서 3 개월로 연장할 경우 보조급수계통의 불이용도는 약 9.1% 증가하고, 이 증가비율은 원자력연구소에서 수행한 원전 정지기준개선 및 운전신뢰성 제고 연구[4]에서 제시한 계통 불이용도기준 점검주기 변경 요건에 부합되므로 보조급수펌프의 점검주기 연장이 가능하다.

위의 결과로부터 허용정지시간이 증가할때, 불이용도 만을 고려할 경우 발전소의 경제성은 제고되지만 안전성은 떨어지며, 허용정지시간이 줄어들수록 경제성은 줄어들지만 안전성이 증가되는 측면을 추론할 수 있다. 허용정지시간에 대해서 점검주기에 따라 계통의 불이용도가 최소가 되는 점이 존재함을 그래프상에서 알 수 있는데, 원전의 중요 시스템이나 부품들에 대하여 허용정지시간과 점검주기 변화에 따른 불이용도의 변화곡선을 도출하고 도출된 추이를 이용하여 허용정지시간과 점검주기를 최적화할 수 있다.

4. 참고문헌

1. Korea Atomic Energy Research Institute, 'Final Level I PRA Update for Younggwang Nuclear Unit 3 and 4' July 1993
2. G. Apostolakis and T. L .Chu, 'The Unavailability of Systems Under Periodic Test and Maintenance.' Nuclear Technology Vol.50, Mid-Aug., 1980

3. Lobel R and Tjader T. R, 'Improvements to Technical Specification Surveillance Requirement,' NUREG-1366, May 1992
4. 채성기 외, '원전 정지기준개선 및 운전신뢰성 제고 최종연구보고서,' 한국원자력연구소
5. S. A. Martorell, V. G. Serradell and P. K. Samanta, 'Improving Allowed Outage Time and Surveillance Test Interval Requirements: A Study of Their Interactions Using Probabilistic Methods,' Reliability Engineering and System Safety 47 (1995) 119-129

표 1. MDP001PA 와 DDP002PA 의 실패 자료

고장모드	실패 자료 (Failure Data)	
	MDP001PA	DDP002PA
동작요구시 고장	3.0E-3/d* (10.0**)	2.0E-2/d (10.0)
동작시 고장	1.5E-4/h (10.0)	1.0E-4/h (10.0)
동작요구시 공통원인고장	2.4E-4/d (10.0)	1.6E-3/d (10.0)
동작시 공통원인고장	4.5E-7/h (10.0)	3.0E-7/h (10.0)

* /d means per demand, /h per hour
** number in parenthesis is error factor

표 2. AOT 와 STI 의 변화에 따른 보조급수계통의 불이용도

STI (hour)	AOT 12 h		AOT 24 h		AOT 72h		AOT 168 h	
	Mean	EF*	Mean	EF	Mean	EF	Mean	EF
168	1.573E-5	5.538	3.317E-5	6.782	6.405E-5	8.831		
360	1.056E-5	5.081	1.888E-5	5.481	3.436E-5	7.876	7.029E-5	8.743
720	1.068E-5	5.565	1.276E-5	5.926	2.142E-5	7.060	4.409E-5	7.884
1080	1.263E-5	5.803	1.325E-5	5.618	2.057E-5	6.329	2.959E-5	7.537
1440	1.563E-5	6.346	1.576E-5	6.112	2.215E-5	6.416	2.779E-5	6.798
2160	2.150E-5	6.682	2.319E-5	6.425	2.337E-5	6.726	2.868E-5	7.699

* EF means error factor, $EF = \sqrt{\frac{X_{95}}{X_{05}}}$

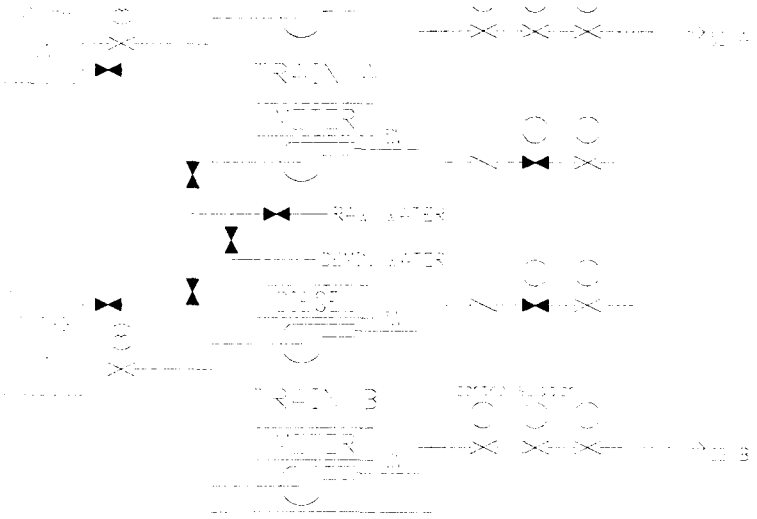

그림 1. Simplified P&ID of AFWS.

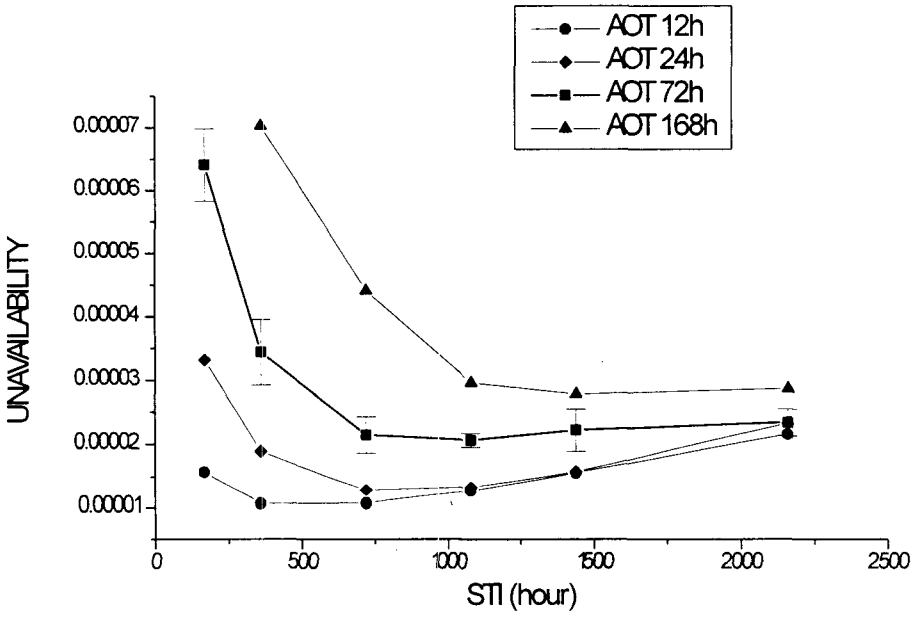

그림 2. AOT 와 STI 의 변화에 따른 보조급수계통 불이용도.