'99 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

전이 위험도를 고려한 허용정지시간 평가 연구

Study on the Evaluation of Allowed Outage Time considering Transition Risk

강대일, 김길유
dikang@nanum.kaeri.re.kr, kykim@nanum.kaeri.re.kr,
원자력연구소

요 약

본 연구에서는 전이 위험도를 고려하여 허용정지시간을 평가하였다. 허용정지시간 평가대상은 울진 3,4호기의 고압안전주입계통과 보조급수계통이다. 이들 계통의 전이 위험도를 평가하기 위해 1단계 PSA 모델에 정지운전의 특성을 반영하여 저출력운전 위험도와 고온대기.고온정지 운전시의 위험도, 그리고 기동 운전시의 위험도를 정량화했다. 정지운전과 기기수리는 고장탐지후 바로 시작한다고 가정하였다. 허용정지시간 평가결과 고압안전주입계통의 현 허용정지시간은 적절한 것으로 나타났고, 보조급수계통의 현 허용정지시간은 매우 크게 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract

In this paper, a study on the evaluation of allowed outage time(AOT) was performed considering the transition risk. The objects of evaluation are the AOTs of high pressure safety injection system and auxiliary feedwater system of Ulchin Units 3 & 4. Risks for low power operation, standby and hot shutdown operation, and startup operation were quantified to evaluate the transition risk of those systems using Level 1 probabilistic safety assessment(PSA) model of Ulchin Units 3 & 4 incorporating the general characteristics of shutdown operations. It is assumed that the shutdown operation and equipment repair are immediately initiated after the identification of equipment failure. The evaluation results show that the presnt AOT of high pressure safety system is appropriately determined and the present AOTs of auxiliary feedwater safety system can be incredibly increased very large.

1. 서론

전이 위험도(transition risk)란 전출력운전(full power operation)에서 특정 정지 운전, 그리고 다시 특정 정지 운전에서 전출력운전까지의 운전상태 변경시 이와 관련된 위험도를 말한다[1, 2]. 여기서 특정 정지운전이란 고온대기나, 고온정지, 또는 상온정지 운전을

말한다. 전이 위험도가 정지운전에 대한 위험도와 밀접히 관련돼 있기 때문에 전이 위험도 평가는 정지운전 위험도 평가와 밀접한 관계가 있다. 전이 위험도 평가는 일반적으로 전출력 운전 중 안전 계통의 고장으로 보수(maintenance)를 수행하고자 할 경우, 이 기기를 정지운전 중에 보수할 것인지 전출력운전 중에 보수를 할 것인지를 결정하기 위해 수행한다. 또한 정지운전에 관한 기술지침서 사항을 변경하거나 기술지침서 변경의 타당성을 정당화하기 위해 수행한다[2, 3].

전이 위험도에 대한 기존 연구 결과를 보면 T. Mankamo 등 [4]은 정지 전이도(shutdown transition diagram)을 사용하여 전이 위험도를 평가함으로써 잔열제거계통 등의 운전제한조건인 허용정지시간과 조치사항(action statements)들의 타당성을 평가하였다. Sylvain 등[5]은 1단계 PSA 모델에 정지운전 특성을 반영하여 전이 위험도를 평가함으로써 허용정지시간을 결정하였다. Finicum 등[6]은 기술지침서 변경의 타당성을 보이기 위해 1단계 PSA 모델에 정지운전 특성을 반영하여 참고문헌 [2]의 방법론에 따라 전이 위험도를 평가하였다.

한국원자력연구소에서 수행된 허용정지시간에 관한 연구 결과[7]를 보면 울진 3,4호기의 주요 안전계통의 현 허용정지시간은 대부분이 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 고압안전주입계통과 보조급수계통의 허용정지시간 관련 위험도는 NRC의 규제 기준치[3]를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 Sylvain 등의 전이위험도 평가 방법론을 사용하여 고압안전주입계통과 보조급수계통의 허용정지시간을 평가하였다.

2. 전이 위험도 평가 모델

전이 위험도를 고려한 허용정지시간의 평가는 기기의 고장과 수리와 관련해 시간에 따라 변화하는 전출력운전 위험도와 전이(정지운전) 위험도의 누적분을 계산함으로써 이루어진다. 기기고장이 발생하면 전출력운전의 위험도는 기기고장으로 인한 계통 이용불능으로 기기가 수리될때까지 위험도가 증가한다. 정지운전시의 위험도는 계통이용불능과 출력 감발로 인해 증가된 과도사건 빈도때문에 정지운전 위험도가 증가하게 된다. 어느정도의 시간이 지나면 낮아진 잔열과 길어진 운전원 여유시간 때문에 정지운전시의 위험도는 감소하게된다. 정지운전에서 다시 기동을 하게되면 출력 증가로 인해 증가된 과도사건 때문에 위험도는 증가하게된다.

Sylvain 등[5]은 누적된 전출력운전 위험도와 전이 위험도의 차이가 규제 기준치와 같다고 보고 이에 대한 허용정지시간을 구하였다. 본 논문에서는 두 위험도의 누적분이 같다고 했을 경우의 기기 수리시간을 구하고, 이 기기 수리시간에서 허용정지시간을 구했다. 일정시간에 걸쳐 연속운전과 정지운전의 위험도가 같다고 했을 경우, 이에 대한 관계식은 아래와 같이 나타낼 수 있다;

동일 시간대에서의 기기 고장과 수리 완료후와 관련된 전출력운전 위험도

= 동일 시간대에서의 기기 고장과 수리 완료후와 관련된 전이 위험도

= 전출력운전에서 특정 정지운전까지의 위험도

+ 특정 정지운전에서 전출력까지의 정지 위험도

이를 수식으로 상세히 표현하면 전출력 운전에 대한 위험도와 전이 위험도의 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다;

$r_{co} = r_{tr}$.....(식 1)

$r_{co} = R_1(POS\ 0)^* t_{re} + R_B(POS\ 0)^*(\Sigma t_i + \Sigma t_j - t_{re})$.....(식 2)

$r_{tr} = \Sigma R_1(POS\ i)^*t_i + \Sigma R_B(POS\ j)^*t_j$ .....(식 3)

r_{co}: 연속 운전시 노심손상확률,

$R_1(POS\ 0)$: 전출력 운전시 기기 고장으로 인해 증가된 위험도

$R_B(POS\ 0)$: 전출력 운전시 기기가 이용가능한 경우의 기본 위험도

t_{re}: 기기 수리시간

r_{tr}: 전이 위험도로써 정지 운전에 대한 노심손상확률

$\Sigma R_1(POS\ i)^*t_i$: 기기 고장후 수리 완료까지 전출력 운전에서 특정 정지운전까지의 위험도

$R_i(POS\ i)$: 기기 고장으로 POS i에서 정지 운전시 증가된 위험도

t_i: POS i에서의 운전시간

$\Sigma R_B(POS\ j)^*t_j$:기기 수리후 특정 정지운전에서 전출력까지의 위험도

$\Sigma R_B(POS\ j)$: 기기 수리후 POS j에서의 정지 운전시 기본 위험도

t_j: POS j에서의 운전시간

위의 (식 3)에서 알 수 있듯이 전이 위험도에 중요하게 영향 미치는 요인은 각 정지운전에서의 노심손상 빈도와 정지운전 시간이다.

3. 울진 3,4호기 적용

2절에서 언급한 전이 위험도 평가 모델을 울진 3,4호기의 고압안전주입계통과 보조급수계통의 운전제한조건인 허용정지시간에 적용하여 이들 계통의 허용정지시간을 결정하였다.

3.1 고압안전주입계통과 보조급수계통의 운전제한조건

현재 울진 3,4호기의 기술지침서[8]에 제시된 고압안전주입계통과 보조급수계통의 허용정지시간은 각각 72시간과 7일이다. 만일 이 허용정지시간을 만족시키지 못하면 6시간이내에 고온대기 상태로 가야하고, 그다음 6시간이내에 고온정지 상태로 가야한다. 이들 계통의 운전제한조건이 표 1에 나타나 있다;

표 1. 고압안전주입계통, 보조급수 계통의 운전제한조건

운전제한조건	AOT	AOT 불만족시 1차	AOT 불만족시 2차
1개의 비상급수계통 (고압안전주입 또는 저압안전주입) 계열 이용 불능시	72시간	6시간내에 고온대기	6시간내에 고온정지
모든 비상급수 부속계통 이용불능시	1시간	20시간내에 상온정지	
보조급수 펌프 1대 이용 불능시	7일	6시간이내 고온대기	18시간이내 고온정지
보조급수계통 1 계열 이용 불능시	72시간*	6시간이내 고온대기	18시간이내 고온정지
보조급수계통 각 계열 당 1대의 펌프 이용 불능시	72시간	6시간이내 고온대기	18시간이내 고온정지

*: 2펌프중 1대이상

3.2 전이 위험도 평가를 위한 PSA 모델

울진 3,4호기의 전이 위험도를 평가하기 위한 PSA 모델이 없기 때문에 1단계 PSA 모델에 정지운전 특성을 반영하여 변경해야 한다. 영광 5&6 호기 저출력/정지 PSA에서 사용했던 운전상태(plant operational state:POS) 분류 방식[9]을 울진 3,4호기에 적용하면, 울진 3,4호기의 운전상태는 16개로 나눌 수가 있다. 이 운전상태 중 전출력운전 위험도와 전이 위험도의 평가와 관련있는 운전상태는 표 2에 나타나 있듯이 POS 0, POS 1, POS 2, POS 15이다.

표 2. 정지운전 상태와 원자로의 물리적 조건

POS	POS 0	POS 1	POS 2	POS 15
운전 종류	전출력 운전	저출력 운전	고온대기/고온정지	기동운전
반응도, 열출력, 저온관 온도	$K_{eff}\geq 0.99$, 5%>, $T_{cold}\geq 350\,^{\circ}F$	$K_{eff}\geq 0.99$, >5%또는 5%≥, $T_{cold}\geq 350\,^{\circ}F$	$K_{eff}<0.99$, 0%, $T_{cold}\geq 350\,^{\circ}F$ / $K_{eff}<0.99$, 0%, $210\,^{\circ}F< T_{cold}< 350\,^{\circ}F$	$K_{eff}\geq 0.99$, 5%≥, $T_{cold}\geq 350\,^{\circ}F$

표 2에 나타난 각 POS의 정지위험도를 평가하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다;

1) POS 1에서의 가정사항

가. 발전소 배열과 초기사건에 대한 발전소 반응이 전출력 운전과 동일하다고 가정한다.

나. 초기사건 빈도는 주급수 상실사고만 제외하고 동일하다고 가정했다. 출력 변경, 급수계통의 수동 조절, 주급수 조절을 주급수 조절 밸브에서 주급수 우회 밸브로 변경함에 따라 주급수 상실사고 빈도는 전출력 운전에 비해 증가한다. 참고문헌 [6]에 따라 주급수 상실사고 빈도는 전출력 운전에 비해 15.22배 증가한다고 가정했다.

2) POS 2에서의 가정사항

가.발전소 정지만을 제외하고 발전소 배열과 초기사건에 대한 발전소 반응이 전출력 운전과 동일하다고 가정하였다.

나. 잔열이 낮기 때문에 운전원 여유시간이 2배 정도 많다고 가정하여, 전출력 운전에서 1시간이내 소외전원 회복 못할 사건에 대한 확률 값을 2시간이내 소외전원 회복 못할 확률 값으로 변경하였다.

다. 원자로 냉각재의 온도와 압력은 전출력 운전에 비해 매우 낮아지기 때문에 LOCA 빈도(Large, Medium, Small LOCA)는 매우 낮아질 것이다. 참고문헌 [6]에 따라 LOCA 빈도는 전출력 운전에서의 빈도보다 1/20로 감소된다고 가정하였다.

3) POS 15에서의 가정사항

가. 고장난 기기가 이용가능한 것을 제외하고는 POS 1과 동일한 가정을 하였다.

3.3 허용정지시간 결정

허용정지시간 결정을 위한 전이 위험도 평가시 참고문헌 [4,5]과 운전원의 면담을 토대로 다음과 같은 가정사항을 하였다.

1) 정지운전은 고장 탐지 직후 바로 시작한다.
2) 기기 수리는 전출력 운전이나 정지 운전 모두 고장 탐지 직후 바로 시작한다.
3) 정지운전 시작후 운전원은 가능한 고온대기에 안들어가며 기기를 수리한다.
4) 정지운전시 기기 수리가 완료되면 바로 전출력 운전으로 돌아간다. 즉 기기 수리가 저출력운전에서 끝나면 저출력운전에서 전출력 운전으로, 고온정지에서 기기 수리가 끝나면 고온정지에서 전출력운전으로 돌아간다.
5) 기기수리가 고온대기에 들어가기 이전에 종료되면, 종료되는 싯점에서 전출력운전까지 소요되는 시간은 기기 수리시간과 같다고 가정한다.
6) 고온정지까지 운전했다면 고온정지에서 고온대기 까지는 5시간, 고온대기에서 계통병입까지는 10시간, 계통병입에서 전출력 운전까지는 20시간이 소요된다고 가정한다.

위와같은 가정사항과 (식 2)와 (식 3)을 고압안전주입계통에 적용해 다음과 같은 결과를 얻었다;

1) 정지운전시간 < 78 시간 : 고온대기운전에 들어가기 전
정지 운전시간이 고온대기운전에 들어가기전인 78시간보다 작을 경우, 전출력 운전에 대한 위험도가 정지운전의 위험도보다 작게 나타났고 (식1)의 관계식에서 기기수리시간은 불능으로 구할 수가 없었다. 정지운전시간이 78시간보다 작을 경우, 계속 운전하며 기기를 수리하는 것이 정지운전 보다는 발전소의 위험도를 작게한다.
2) 정지운전시간 = 78 시간 : 고온대기운전에 들어갈 경우
정지운전시간이 78시간일 경우, 기기수리시간과 정지운전과의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다;

$$t_{re} = 1.15t_1 + 2.08(hr)$$

여기서 t_1은 저출력 정지운전 시간으로서 전출력운전에서 고온대기에 들어가기 전까지의 운전시간이다. 또 이 식은 기기 수리가 항시 고온정지 운전에서 항시 끝난다고 했을 경우에, 정지운전 시간과 기기 수리시간과의 관계를 나타낸다.

고압안전주입계통과 같은 방식으로 표 1에 있는 운전제한조건에 위의 가정사항들과 (식1), (식2), (식3)을 적용하게 되면, 표 3의 분석결과를 얻게된다. 각 운전제한조건에서

고온대기에 들어가기 전까지는 (식1)의 기기 수리시간에 대한 해는 불능이 되고, 고온대기에 들어가기 전까지는 계속 운전하면서 기기를 수리하는 것이 발전소의 위험도를 작게한다. 표 1의 운전 제한조건에 대한 정지운전 시간과 기기 수리시간의 관계식, 그리고 허용정지시간이 표 3에 나타나있다. 표 3에 나타나 있는 허용정지시간 모두는 표 1에 있는 현재의 허용정지시간보다 높게 나타났다. 따라서 고압안전주입계통의 현 허용정지시간은 적절히 설정되 있는 것으로 판단되고, 보조급수계통의 현 허용정지시간은 크게 늘릴 수 있는 것으로 나타났다.

표 3. 전이 위험도 평가에 따른 허용정지시간

운전제한조건	정지운전시간과 수리시간과의 관계식	허용정지시간
1개의 비상급수계통 (고압안전주입) 계열 이용불능시	$t_{re} = 1.15t_1 + 2.08(hr)$	85.72시간 (3.57일)
1개의 비상급수계통 (저압안전주입) 계열 이용불능시	$t_{re} = 1.80t_1 + 17.28(hr)$	151.68시간 (6.32일)
보조급수 펌프 1대 이용불능시	$t_{re} = 79.24t_1 + 132.7(hr)$	13914시간 (579.7일)
보조급수계통 1 계열 이용불능시	$t_{re} = 1000t_1 + 87.4(hr)$	78868시간 (3286.6일)
보조급수계통 각 계열 당 1대의 펌프(모터구동) 이용 불능시	$t_{re} = 910t_1 + 54.4(hr)$	71028시간 (2959.5일)
보조급수계통 각 계열 당 1대의 펌프 (터빈구동) 이용 불능시	$t_{re} = 187t_1 + 58(hr)$	14638시간 (609일)

*: 2펌프중 1대이상,

3.4 전이 위험도의 중요 영향 인자

전이 위험도를 이용한 허용정지시간 결정은 전이 위험도 평가 결과에 따라 달라지기 때문에 전이 위험도에 중요하게 영향 끼치는 평가 모델과, 각 정지운전에서의 위험도 결과를 검토하고 논의하였다.

본 연구에서는 전이위험도 평가시 정지운전을 시작하며 기기를 수리한다고 가정했지만 참고문헌 [2, 4, 6]에서는 특정 운전모드에서만 기기를 수리한다고 가정하였다. 만일 기기수리를 특정 정지운전 모드에서만 수행된다면 이에 대한 연속운전과 정지운전에 대한 위험도 평가식은 다음과 같이 표현된다;

$$r_{co} = R_0(POS\ 0)^* t_{re} + R_0(POS\ 0)^*(\Sigma t_i + \Sigma t_j) \quad \text{.....(식 4)}$$

$$r_{tr} = \Sigma R_i(POS\ i)^* t_i + R_i(POS\ i)^* t_{re} + \Sigma R_j(POS\ j)^* t_j \quad \text{.....(식 5)}$$

(식1)과 (식4)와 (식5)를 고압안전주입계통에 적용하면 다음과 같은 결과를 얻게된다;

$$t_{re} = 2.37^*(t_1 + t_2) + 2.08,$$

여기서, t_2는 고온대기에서 고온정지까지의 운전시간이다.

참고문헌 [2, 4]처럼 운전원이 가능한 빠르게 전출력 운전에서 고온정지운전까지 간다면 그 소요시간은 약 2시간이 될 것이다. 이 경우 기기 수리 시간은 6.82시간이고 3.3절과는 다르게

이시간이 허용정지시간이 된다. 본 논문 3.3절의 가정처럼 운전제한조건을 만족하지 못해 수행해야만 하는 조치사항을 운전원이 가능한한 늦게 수행한다면, 허용정지시간은 189시간(7.8일)이 된다. 또 참고문헌 [6]과 같이 정지운전시간이 4일이라면 적정 허용정지시간은 9일이 된다. 평가된 허용정지시간 이내에서의 연속운전 위험도는 전이 위험도보다 작다. 그러나 (식 4)와 (식 5)는 실제적인 발전소 상황을 반영하지 못하는 점이 있다. 왜냐하면 발전소가 운전제한조건에 상황에 있을 경우, 운전원은 가능한한 기술지침서의 현 규정내에서 기기를 수리할 것이기 때문이다. 즉, 허용정지시간이 72시간이고 이것을 만족시키지 못할 경우 6시간이내 고온대기에 간다면, 운전원은 가능한한 기기고장 탐지후 78시간 이전까지는 고온대기에 안들어가며 기기를 수리할 것이다.

표 3의 결과는 정지 위험도가 전출력 운전 위험도 보다 크고 전이 위험도 평가 모델이 현재의 운전제한조건을 토대로 했기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 만일 POS 1에서의 정지 위험도가 전출력 운전시보다도 작다면 표 3과는 다른 결과를 얻을 것이다. 표 4는 주급수 상실사고 빈도 변화시의 허용정지시간을 나타내고 있다. 주급수 상실사고 빈도가 전출력 운전시의 0.1배로 줄어든 경우에는, 전출력 운전의 위험도가 항시 전이 위험도보다 크게 나타나고, 기기수리시간 또한 항시 정지운전 시간보다 작게 나타난다. 즉, 기기 고장이 발생할 경우 발전소의 위험도를 작게하는 운전은 발전소를 정지운전하면서 기기 수리를 하는 것이다. 주급수 상실사고 빈도가 2배일 경우에는 표 3과 유사한 결과를 얻게되지만, 보조급수계통에 대한 허용정지시간은 표 3과 비교해 볼 경우 상대적으로 매우 작게 나타났다.

표 4. 주급수 상실사고 빈도 변화시 전이 위험도 평가에 따른 허용정지시간

운전제한조건	정지운전시간과 수리시간과의 관계식	허용정지시간	비고
주급수 상실사고 빈도 =0.1배			
1개의 비상급수계통 (고압안전주입) 계열 이용불능시	$t_{re} = 0.98t_1 - 0.55(hr)$	69.89시간 (2.91일)	
보조급수계통 1 펌프 이용불능시	$t_{re} = -4.12t_1 - 13.4(hr)$	불능	
주급수 상실사고 빈도 =2 배			
1개의 비상급수계통 (고압안전주입) 계열 이용불능시	$t_{re} = t_1 + 0.689(hr)$	72.69시간 (3.02일)	
보조급수계통 1 펌프 이용불능시	$t_{re} = 6.27t_1 + 4.39(hr)$	1089.37시간 (45일)	

4. 결론

본 연구에서는 전이 위험도를 고려하여 허용정지시간을 평가하였다. 평가 대상은 울진 3,4호기의 고압안전주입계통과 보조급수계통이다. 이들 계통의 전이 위험도를 평가하기 위해 1단계 PSA 모델에 정지운전의 일반적인 특성을 반영하여 저출력운전 위험도와 고온대기.고온정지

운전시의 위험도, 그리고 기동운전시의 위험도를 평가하였다. 정지운전과 기기수리는 고장탐지직후 바로 시작한다고 가정하였다. 허용정지시간 평가결과 고압안전주입계통의 현재 허용정지시간은 적절하게 설정돼 있는 것으로 나타났으며, 보조급수계통의 현재 허용정지시간을 매우 크게 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

전이 위험도를 고려한 허용정지시간 결정은 전이 위험도 평가 수행시 사용하는 가정사항과 분석모델, 각 POS에서의 정지 위험도에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 가정사항과 분석모델, 그리고 일부 POS에서의 위험도 변화가 미치는 허용정지시간을 검토하고 논의하였다. 각 POS에서의 위험도를 정확하게 평가하기 위해서는 참조 발전소인 울진 3, 4호기 발전소의 정지운전 특성을 세부적으로 파악해야 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 본 논문에서 허용정지시간 결정을 위해 사용한 전이 위험도 평가모델의 타당성에 대한 연구가 좀 더 수행되야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다

참고문헌

[1] 조남진, 정우식, "원자력발전소의 안전성 목표와 확률론적 안전 기준", 한국원자력학회지, Vol.23, No.2, 1991

[2] P. K. Samanta, I.S. Kim, T. Mankamo, and W.E. Vesely., "Handbook of Methods for Risk-Based Analyses of Technical Specification", NUREG/CR-6141, 1994

[3] USNRC, "An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking:Technical Specifications", Regulatory Guide 1.177, August 1998

[4] T. Mankamo, et al., "Technical Specification Action Statements Requiring Shutdown", NUREG/CR-5995, 1993

[5] Sylvain, M., Derriot "Methods concerning Risk-Based Assessment of Technical Specifications", 5th Inter' Conference on Nuclear Engineering, May 26-30, page 1-5, 1997, Nice, France

[6] David Finnicum, et al., "A Methodology for Evaluation of Transition Risk", PSA '97, page 100-105, 1997.

[7] 강대일 외, "울진 3,4호기의 허용정지시간 변경에 대한 연구"'98 추계 학술발표회 논문집 한국원자력학회, 1998

[8] "Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3 & 4", KEPCO, 1997

[9] 박진희 " 영광 5,6 저출력/정지 PSA를 위한 POS 분류에 대한 세미나 자료", 1998