'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

정비규정 적용에서의 주기적 성능 평가와 이용도, 신뢰도의 균형화

The Periodic Assessment and Balancing between Availability and Reliability at Maintenance Rule Implementation

황미정, 김길유, 하재주

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

정비규정 10CFR50.65 (a)(3)항에서는 주기적인 발전소의 성능평가를 통해 정비의 효율성을 감시하고 이와 함께 이용도와 신뢰도가 균형을 이루는 지를 확인할 것을 요구하고 있다. 이에 따라 주기적 성능 평가 방법과 이용도와 신뢰도 균형화 방법에 대한 조사를 수행하고 어떤 방법을 채택하는 것이 효율적인지를 살펴보았다.

정비규정 프로그램 수행 시, 우선 초기에 이용도와 신뢰도에 대한 SSC 성능기준을 먼저 설정한다. 그리고 발전소의 실제 성능을 평가하여 실제 성능이 노심 손상에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 주기적인 성능평가를 수행한다. 주기적 성능 평가 시에 실제 성능 평가를 통해 초기에 설정된 성능기준과 비교하여 신뢰도와 이용도가 균형을 이루고 있는지를 평가한다. 평가 결과 필요한 경우 성능기준이나 성능 목표를 변경함으로써 신뢰도와 이용도가 균형을 이루도록 조정한다.

Abstract

The Maintenance Rule(10CFR50.65) part (a)(3) requires that adjustments be made where necessary to ensure that the objective of preventing failures of SSCs through maintenance was appropriately balanced against the objective of minimizing unavailability of SSCs due to monitoring or preventive maintenance activities. Periodic evaluation of any risk-significant SSCs would indicate whether monitoring or preventive maintenance activities cause excessive unavailability that have a negative improvement in reliability. Therefore, we came to the study on periodic assessment and balancing between availability and reliability.

As a part of Maintenance Rule periodic assessment, the risk impact of actual SSC unavailability and functional failures over the assessment period are evaluated using the plant PSA model.

1. 서 론

정비규정 10CFR50.65[1] (a)(3)항에서는 주기적인 발전소의 성능평가를 통해 정비의 효율성을 감시하고 이와 함께 이용도와 신뢰도가 균형을 이루는 지를 확인할 것을 요구하고 있다. 이에 따라 주기적으로 발전소의 정비가 효율적으로 이루지는 지를 평가하는 방법과 이용도와 신뢰도 균형화 방법에 대한 조사를 수행하고 어떤 방법을 채택하는 것이 효율적인지를 살펴보았다.

정비규정은 발전소의 부적절한 성능 경향 해석과 사고 근본 원인 분석(root cause analysis)으로 인한 반복적인 고장을 감지하여 적절한 정비 방법을 찾아 같은 고장이 발생을 방지하기 위한 수단이다. 그러므로 안전 기능에 영향을 미치는 원인을 찾아내고, 이를 수리하는데 초점을 두어 동일한 고장의 반복을 줄이도록 정비 방법을 바꿀 수 있도록 한다. 또한, 각 SSC(Structures, Systems, Components)에 대한 주기적인 성능평가를 통해, 감시나 예방정비가 신뢰도 향상에 저해 요인을 제공할 수 있는 과도한 이용불능도를 초래하는지를 인지한다.

정비규정 프로그램 수행을 위해서는 우선 초기에 이용도와 신뢰도 그리고 상태 등에 대한 개별 SSC 성능기준과 발전소 전체 수준 (Plant level) 상능기준을 먼저 설정한다. 그리고 실제 성능이 초기에 설정된 성능기준을 만족하는 지를 감시함으로써 발전소 정비가 효율적으로 수행되고 있는지를 확인한다.

이를 위해 정비규정 적용 시 위험도에 미치는 영향이 큰 SSC에 대해서는 각 SSC의 개별적인 성능기준을 설정하고 위험도에 미치는 영향이 작은 SSC에 대해서는 발전소 전체 수준의 성능기준을 설정하여 이를 기준으로 발전소의 성능을 감시한다.

주기적인 성능평가 수행을 위해서는 발전소의 실제 성능을 평가하여 실제 성능이 노심 손상에 미치는 영향을 평가하는 방법을 사용한다. 또한, 주기적 성능 평가 시에 실제 성능 평가를 통해 초기에 설정된 성능기준과 비교하여 신뢰도와 이용도가 균형을 이루고 있는지를 평가한다. 평가 결과 필요한 경우 성능기준이나 성능 목표를 변경함으로써 신뢰도와 이용도가 균형을 이루도록 조정한다.

이용도와 신뢰도의 균형화는 설정된 성능기준에 대해 감시되는 발전소의 실제 성능이 만족하는지를 확인하는 것이다. 즉, 정비 방법 변경 결과, 이용도 변경이 오히려 신뢰도를 낮추는 결과를 초래하여 발전소 위험도가 증가하는 경우가 있는데 변경된 정비 방법에 의한 성능이 성능기준을 만족하는지를 균형화를 통해 적절한지를 판단한다. 이러한 작업들은 발전소의 주기적 성능 평가 시에 수행된다.

그러므로 본 논문에서는 주기적 발전소 정비 효율성의 평가 방법 및 균형화 방법 및 초기 성능기준 설정에 대한 설명을 한다.

2. 성능기준 설정

정비규정 적용 프로그램에서 개별 SSC의 성능기준으로 사용되는 일반적인 값은 이용도 (Availability)와 신뢰도 (Reliability)이다. 그러므로 성능기준 설정을 위해서는 적절한 신뢰도 및 이용불능도 계산 방법을 선택해야 한다. 초기에 성능기준 설정 시 정비규정 적용 절차에서 요구되는 이용도와 신뢰도의 균형화를 고려하여 성능기준을 설정하면, 후에 성능기준이나 목표를 재설정해야 하는 작업을 줄일 수도 있을 것이다.

2.1 이용도 성능기준 설정

이용도는 이용불능도의 반대 개념이므로, 이용불능도를 계산하여 이용도 성능기준을 설정한다. 이용불능도는 특정 계통이 그 기능을 수행하도록 요구된 총 시간에 대해 요구된 기능을 수행하지 못하는 비율이나 시간으로 설정된다.

과거에 발생했던 사건이 미래에 발생할 사건과 연관이 많다는 근거 하에 과거 고장이력과 정비 이용불능도로부터 도출된 결과로 이용불능도 성능기준을 설정한다. 이 때, 정비 이력은 최근 2주기 정도의 이력을 사용하는 것이 바람직하다.

발전소 정비 이력을 쉽게 얻을 수 있는 경우는 이들 자료를 활용하는 것이 바람직하다. 그러나 정비규정 적용 준비가 미흡하여 데이터 수집이 어려운 경우는 PSA에서 사용한 값을 이용불능도 성능기준으로 설정하고, 주기적으로 수행되는 발전소 성능 평가 시 균형화를 통해 성능기준을 재설정할 수도 있다.

초기 이용불능도 성능기준을 설정할 때는 대체로 다음과 같은 기준을 사용하여 설정하면, 균형화 시에 성능기준을 재설정해야 하는 작업을 최소 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

첫째, 각 정비규정 기능에 대한 이용불능도 성능기준은 PSA에서 가정한 이용불능시간과 정비규정 감시기간 동안에 발견되는 단위 최대 이용불능 시간을 비교하여 결정한다. 이용불능도 성능기준이 PSA에서 가정한 이용불능 시간보다 작으면 더 이상의 분석이 필요 없이 그대로 이용불능도 성능기준으로 사용한다. 반면, 이용불능도 성능기준이 PSA에서 사용한 이용불능시간보다 크면, 민감도 분석을 수행하고 노심손상빈도에 미치는 영향을 파악하여 이 성능기준이 허용 가능한 지를 판단한다. 노심손상빈도가 10^{-4}/yr 보다 작을 경우, 허용 가능한 노심손상빈도 증가량, ΔCDF%는 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta CDF\ \% = 10^{-0.5 \log CDF_{base} - 1}$$

둘째, 각 SSC가 위험도에 미치는 영향 정도에 따라 이용불능도 허용치를 제한한다. 즉, 각 SSC에 대한 RAW 값에 따라 이용불능도 허용치를 제한하여 이용불능도 성능기준을 설정한다.

표1은 Duke Power Company[10]에서 실제 사용하고 있는 이용불능도 제한 기준치의 한 예이다.

표 1. 위험 정도에 따른 이용불능도 제한치 예

RAW	이용불능도
OOS를 허용하지 않는 SSC	0%
RAW가 5보다 매우 큰 경우	0.2%
RAW ≥ 5	2%
2 ≤ RAW < 5	4%
RAW < 2	6%

2.2 신뢰도 성능기준 설정

SSC의 신뢰도 향상을 위해 정비 방법 개선이 언제 필요한 지를 인지하기 위해 적절한 정비를 통해 방지할 수 있는 기능 고장 (MPFF : Maintenance Preventable Functional Failure) 기준을 설정한다.

정비규정에서는 약 2주기 정도의 정비규정 감시 기간 동안의 데이터를 수집하여 그 기간 동안의 실패율을 정하고, 이를 신뢰도 성능기준으로 정하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 정비규정에서 요구하는 약 2년 정도의 짧은 기간 동안의 신뢰도 평가는 복잡할 뿐 아니라, 얻을 수 있는 데이터의 양이 많지 않으므로 적절한 실패율의 통계치 계산은 불가능하다. 그러므로 EPRI 기술보고서[7,8]에서 제시하는 방법과 같이 허용 가능한 계통의 기능 실패 수를 계산하여 신뢰도 성능기준으로 설정한다. 요구 기준

실패율(demand-based failure rate)을 가진 기능에 대해서는 이항 분포 식으로 허용 가능한 실패 수를 계산한다. 반면, 시간기준(time-based) 실패율을 가진 기능과 demand & time-based 실패율이 모두 포함된 기능에 대해서는 Poisson 분포 식으로 허용 가능한 실패 수를 계산한다.

허용 가능한 실패 수를 계산하기 위해 사용되는 식들은 다음과 같다.

이항확률밀도함수 :

$$P(r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} P^{r} (1-P)^{n-r}$$

Poisson 확률밀도함수:

$$P(n) = \frac{(lT)^{n}}{n!} e^{-lT}$$

이 때, 표2와 같이 계통 기능 실패가 위험도에 미치는 영향 정도에 따라 허용 가능한 실패 수를 제한하여 신뢰도 성능 기준을 설정하면, 이용도와 신뢰도 균형화 시 발전소의 실제 성능과 합치하는 경우가 많을 것으로 예상된다.

표 2. 위험 정도에 따른 신뢰도 성능 기준 제한치 예

RAW	신뢰도 (/18개월)
OOS를 허용하지 않는 SSC	0MPFF
5보다 매우 큰 경우	0MPFF
RAW ≥ 5	1MPFF
2≤RAW<5	2MPFF
RAW <2	2MPFF
기타	no more than 4MPFF

3. 주기적 성능 평가와 균형화

주기적인 발전소 정비 효용성은 감시 대상 기간 동안의 발전소의 실제 성능평가와 더불어 실제 성능이 발전소 위험도에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 수행한다. 즉, 실제 이용불능도와 기능 실패 수를 PSA모델에 입력하여 노심손상빈도를 계산함으로써 그 영향을 평가한다.

이용불능도는 계통, 트레인, 기기에 기반을 두고 감시한다. 이들 이용불능도는 운전원 일지의 기록을 매달 검토하여 이용불능시간을 계산한다.

신뢰도는 고장정비 지시서 (Corrective maintenance order)와 기타 정비 서류를 매월 검토하여 기능 실패 수를 계산한다.

일반적으로 신뢰도 성능기준 설정 시에 모든 SSC에 대해 최대 실패 허용 수가 발전소의 위험도에 미치는 영향을 평가하지는 않는다. 그러므로 발전소 주기 평가 시에 PSA 개정(update)을 한다. PSA 평가 시에는 다음 두 가지 사항을 고려한다.

- PSA 모델에 포함되어 있는 정비규정 SSC로 정비규정 기능고장의 계통 또는 기기의 신뢰도 영향
- 평가 대상 기간 동안 위험도에 미치는 영향이 큰 계통의 이용불능도 기록에서 계산한 이용불능도 자료 사용

실제 성능을 입력하여 계산된 위험도는 위험도 증가 허용치와 비교한다. 실제 성능에 의한 영향이 위험도 증가 허용치를 많이 초과하는 수준이면 정비 방법에 대한 수정이 필요한지 결정한다.

현재, 일반적으로 사용되고 있는 신뢰도와 이용도의 균형화 방법으로는 SSC에 대한 성능 기준이나 목표를 정비규정 적용 초기에 설정하고 영향 받는 기기의 성능 감시를 통해 신뢰도와 이용도가 적절한지를 판단하도록 한다.

신뢰도와 이용도 성능기준의 적절성 여부는 발전소의 실제 성능을 이용하여 평가한 PSA 결과를 이용하여 확인한다. 즉, PSA 평가 결과, CDF에 미치는 영향에 따라 허용 가능한 이용불능시간을 제한하는 방법으로 성능 기준을 재설정 할 수 있다. 이러한 균형화 작업은 발전소 정비 효율성의 주기적인 평가 시에 반복적으로 수행한다.

표 3. CDF에 미치는 영향에 따른 이용불능시간 제한치 예

CDF 증가치	허용 가능한 이용불능시간
$5\times10^{-7} \sim 1\times10^{-7}$	< 12 시간
$1\times10^{-7} \sim 1\times10^{-8}$	< 60 시간
$1\times10^{-8} \sim 1\times10^{-9}$	< 600 시간
$1\times10^{-9} \sim 1\times10^{-10}$	< 6000 시간
$< 1\times10^{-10}$	제한 없음

4. 결 론

초기 성능기준 설정 시에 각 SSC가 위험도에 미치는 영향 정도에 따라 이용도 성능기준과 신뢰도 성능기준 허용치를 설정하여 성능기준을 설정하는 방법을 고려한다. 즉, RAW 값에 따라 허용 가능한 이용불능도와 신뢰도를 설정하고 정비규정 성능기준 설정 시 이 값을 만족하는 성능기준을 설정하여 신뢰도 이용도 성능 기준 균형화를 통해 성능기준이나 목표를 재설정하는 작업을 줄일 수 있도록 한다. 단, 이 방법은 성능기준 제한치 설정을 어떻게 정해야 하는지에 대한 문제를 해결해야 한다.

주기적인 평가를 위해서는 운전 기록, 기술지침서, 기기 상태 기록, 작업 지시서, 기기 실패 경향, 계통 담당자, trouble report 등의 여러 자료로부터 필요한 데이터를 얻는다. 안전관련 계통에 대한 기존의 성능 감시 자료 또한 그대로 사용해도 된다.

기능 실패 수를 평가 하기 위해서는 정비 규정에서 사용하는 정비규정 기능 실패에 대한 정의를 명확히 하여 혼동이 없도록 해야 한다.

신뢰와 이용도의 균형화는 우선 성능 목표나 성능기준을 설정하고 영향 받는 기기의 성능을 감시하여 성능 기준과 비교를 한다. 그러나 성능 감시 결과 어떤 SSC에 대해서는 이용불능도가 감시되지 않는다. 그러므로 이런 SSC에 대해서는 균형화를 할 수 없다. 특히, 조건부 확률(conditional probability)을 성능기준으로 사용하는 경우에는 균형화 방법이 더욱 까다로워진다. 예를 들어, 설계나 주위 환경 상태의 향상으로 인해 신뢰도가 향상되었더라도 잦은 예방정비로 인해 신뢰도가 향상된 것이라면 이용도는 감소하는 경우가 있기 때문이다. 그러므로 이런 경우에 대한 균형화 방법 연구가 계속되어야 할 것이다.

아울러, 주기적인 성능 평가 및 균형화를 위해서는 정비규정 기능과 PSA 모델과의 연계를 쉽고 간단하게 할 수 있는 방법에 대한 연구도 필요할 것이다.

Acknowledgment

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission,10 CFR 50.65, "Requirement for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", 1991. 7
2. Nuclear Management and Resource Council, NUMARC 93-01, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, Rev.1", 1993. 5
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.160, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, Rev. 1", 1995
4. NUREG-1526, "Lessons Learned from Early Implementation of Maintenance Rule at Nine Nuclear Power Plants," 1995. 6
5. G.P. Rozga, "Calculation/Addendum Title : PSA Assessment of MR APC and RPC" Southern Co. 1998. 12.
6. EPRI Technical Bulletin 96-11-01,"Monitoring Reliability for the Maintenance Rule", 1996.10
7. EPRI Technical Bulletin 97-03-01,"Monitoring Reliability for the Maintenance Rule - Failure to Run", 1997. 3
8. J.T. Hawley, M.A. Melnicoff, "Calculation No.: BRW-97-0938-N : PSA Basis for Braidwood's Maintenance Rule Performance Criteria", ComEd., 1997. 10. 16
9. Mark A. Melnicoff, "PSA Support of Implementation of the Maintenance Rule at COMED", PSA '99 Proceedings, 1999
10. H. Ducan Brewer, Ken S. Canady, "Probabilistic Safety Assessment Support for the Maintenance Rule at Duke Power Company", RESS 63, 1999
11. 김길유, 김태운, 진영호, 홍승열, "정비규정의 국내 원전 적용 첫 타당성 연구", 한국원자력학회, '98추계학술발표회, 1998, 10
12. Yu Shen, G.P. Rozga, "Methodology Development for Risk-Informed Monitoring Criteria in the Maintenance Rule", PSA '99 Proceedings, 1999
13. 황미정, 김길유, "정비규정 적용을 위한 성능기준 평가", 한국원자력학회, '00 춘계학술발표대회, 2000, 5