'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

정비규정 프로그램 연구

Study on Maintenance Rule Program

황미정, 김길유

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

정비규정(Maintenance Rule)[1]은 발전소계통의 적절한 정비를 통해 안전기능이 상실되는 것을 방지하기 위한 목적으로, 원자력발전 사업자가 효율적인 정비를 수행하도록 하기 위한 규제 조치이다. 현재 우리나라에서 수행하고 있는 원전 규제방식은 처방적규제 (prescriptive regulation)이며, 미국에서는 성능위주규제(Performance-based Regulation)로 전환하고 있다. 실제로 1996년 7월 10을 기해 성능위주규제인 정비규정을 미국 내 모든 원전에서 적용하도록 하고 있다.

정비규정에 따라 정비를 수행하면 발전소의 안전성이 향상 되어 불시정지 사건수도 줄어든다. 이에 효율적인 발전소 운전을 위해 국내에서도 정비규정을 도입할 것으로 예상되므로, 국내 발전소에 적용 가능한 정비규정 프로그램의 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 국내 원전에 적용 가능한 정비규정 프로그램 개발을 위해, 정비규정의 전반적인 내용을 검토하고 정비규정 적용 시에 사용할 수 있는 Risk Significant SSCs (Structures, Systems, Components) 선정방법을 제시하고 성능기준 선정을 위한 계통 신뢰도 및 이용불능도 계산 방법에 대해 기술하였다. 아울러 실제 발전소 적용 시에 대두될 수 있는 문제점도 제시해 본다.

Abstracts

The objective of the Maintenance Rule is to require monitoring of the overall continuing effectiveness of licensee maintenance programs to ensure that the safety related and certain nonsafety-related SSCs are capable of performing their intended functions and, for the nonsafety-related equipment, failures will not occur that prevent the fulfillment of safety-related functions, and failures resulting in scrams and unnecessary actuations of safety-related systems are minimized. That is, proper maintenance is essential to plant safety.

The U.S. Maintenance Rule, which was effective on July in 1996 in the U.S.A., was not officially adopted in Korea by the Korean regulatory body. However, since many Probabilistic Safety Assessments(PSAs) and Individual Plant Examinations(IPEs) have been performed for the Korean Nuclear Power Plants(NPPs), the philosophy and usefulness of the Maintenance Rule as well as performance-based regulation are being acceptable.

In this paper, in order to develop the Maintenance Rule program which can be applied to the Korean NPPs, Maintenance Rule program was reviewed and the Risk Significant SSCs selection method, Effective RAW(Risk Achievement Worth), and the Performance Criteria establishment method were described.

1. 서론

정비규정의 목적은 안전관련 또는 비-안전관련 SSCs가 설계기능을 수행하도록 하고, 비-안전관련 SSCs의 고장으로 인해 안전관련 SSCs를 사용할 수 없게 함으로써 원자로 정지에 실패하는 사건이 최소화되도록 원자력발전 사업자가 정비 프로그램의 효율성을 계속 감시하도록 하는데 있다. 예를 들면, 안전기기의 신뢰도(reliability), 이용도(availability), 사용가능도 (operability)가 향상되어 안전관련계통의 고장이 줄어 불시정지 사건 수도 줄어든다. 정비 규정의 기본적 개념은 필요에 따라서 어떤 계통이나 기기의 목표성능을 설정하고, 이 성능에 부합되도록 정비를 수행하는 것이다.

정비규정 적용 프로그램 절차를 간단히 정리하면 다음과 같다.

① 발전소의 여러 SSCs 중 정비규정 적용대상이 되는 SSC를 선정

② 선정된 SSCs가 Risk Significant SSCs인지를 판별

③ 각 SSCs에 맞는 성능 기준을 선정하여 현재 성능이 성능 기준에 부합되도록 정비를 수행한다.

④ 현재 성능이 성능 기준을 만족하지 못하는 경우, 목표치를 새로이 설정하여 정비를 수행하고 이를 만족시키지 못하면 적절한 시정 조치를 취한다.

국내에서는 정비규정을 영광 DG에 적용한 예[6]는 있으나 원전 계통 전체에 적용을 시도한 경험이 없으므로 본 논문에서 이에 대한 연구의 일환으로 울진 3,4호기 정비규정 적용 프로그램 개발에 앞서 Risk Significant SSC 선정 방법과 성능기준 선정을 위한 신뢰도(Reliability)와 이용불능도(unavailability) 계산 방법에 대해 연구하였다.

2. 정비규정

현재 주로 수행되고 있는 규제조치를 처방적규제와 성능위주규제로 구분할 때, 정비규정은 후자에 해당된다. 처방적 규제는 각 발전소마다 원하는 안전 준위를 성취할 수 있도록 하기 위해 필요하다고 생각되는 규정 또는 규범을 정해 놓고 사업자가 이를 지키는지를 심사하는 것이고, 성능위주규제는 발전소의 안전성 또는 성능 목표를 정하고 그것을 유지하도록 성능을 감시하는 지를 심사한다. 이 때, 목표 성능 유지를 감시하기 위해 발전소의 전체적인 성능, 격납용기 성능, 각 계통의 성능 등 단계별로 발전소 성능목표를 세울 수 있다. 정량적인 안전 성능목표의 예로는 노심손상빈도 (Core Damage Frequency ; CDF), 대규모 방사능누출빈도(Large Early Release Frequency ; LERF), 조건부 격납용기 파손확률, 정비이용불능도, 신뢰도 등이 있다. 즉, 성능기준 규제는 발전사업자와 규제 기관이 객관적인 성능목표를 정해 놓고, 대상 발전소가 성능목표를 만족하고 있는지를 심사하는 것이다.

미국에서는 1991년 7월 10일 정비규정[1]을 발표하였으며, 산업체에서는 이에 대한 해석 및 준비 지침으로 NUMARC(Nuclear Management and Resource Council)을 중심으로 1993년 NUMARC 93-01[2]을 발표하였다. NRC(Nuclear Regulatory Commission)는 이를 승인하는 내용의 Reg. Guide 1.160[3]을 발표하고 9개 원전에 시범적으로 정비규정을 먼저 적용[4]하였다. 그리고 1996년 7월 10일을 기해 정비규정을 미국 내 모든 원전에 적용하도록 하고 있다.

2.1 정비효율성 감시 요구사항 [1]

1) SSC의 성능이나 상태를 발전사업자가 설정한 목표를 기준으로 감시해야 한다. 여기서, 목표는 안전성 측면과 운전 경험을 고려해서 설정한다. 감시결과 SSC의 성능이나 상태가 목표에 미달하면 적절한 시정조치를 취해야 한다.

2) 적절한 예방정비에 의해 성능이나 상태가 효과적으로 조절되는 SSC에 대해서는 1)항과 같이 감시할 필요가 없다.

3) 성능 및 상태 감시와 관련 목표치, 그리고 예방정비를 적어도 매 재장전 주기마다 평가하여야 한다. 이 때, 재장전 주기는 24개월을 초과하지 않아야 한다. 그리고 실제 운전경험을 고려하여 모든 평가를 한다. 이 평가에서 목표치를 만족하지 못하는 SSC에 대해서는 필요한 조치를 취하는데, 감시나 예방정비로 인한 SSC의 이용불능도를 최소화할 수 있는 적절한 방법으로 정비를 한다. 이 때, 정비로 인한 이용불능 기기에 의한 안전 기능의 성능에 관한 전반적인 영향을 평가할 수 있어야 한다.

4) 1)항과 같이 감시해야 하는 SSC로는 설계기준사고 시 원자로냉각재 압력경계의 건전성, 원전의 정지능력 상실 또는 방사선의 원전 외부 유출을 초래하는 사고를 방지하거나 완화하는 기능을 작동할 수 있도록 작동되고 있어야 할 안전관련 SSC와, 비안전관련 SSC일지라도 사고나 과도사건을 완화하기 위해 사용되거나 또는 비상운전 절차서에서 사용되거나, 또는 고장으로 인해 안전관련 SSC의 기능을 상실하게 하거나 원자로 불시정지나 안전관련계통을 작동시키면 1)항과 같이 감시해야 한다.

2.2 정비규정 프로그램 수행절차

정비규정 적용을 위한 프로그램 개발 및 수행은 신뢰도 공학자가 하는 것이 일반적이다. 전반적인 수행절차는 앞의 1. 서론 부분에서 설명한 바와 같이 정비규정 적용 대상 SSC를 선정하고, 선정된 SSC 중 Risk Significant SSC를 선정한다. 그리고 각 SSC에 요구되는 성능기준을 선정하고 현재 성능과 비교하여 모니터링을 한다.

일반적으로 정비규정 프로그램으로는 PSA결과를 이용하여 수행하는 방법과 PSA결과를 사용하지 않는 방법으로 나눌 수 있는데 이 두 방법 모두 전문가 그룹(Expert Panel)의 판단 근거 하에 분석해야 할 부분이 많다. 전문가 그룹은 일반적으로 발전과장, PSA분석자, 계통 분석자 등 여러 분야의 종사자들로 구성하는 것이 바람직하고, 발전소 계통 담당자는 정비규정 적용 시 정비규정에 대한 평가 및 성능기준 초과 시에 목표치를 설정하는 일을 담당한다. 그리고 전문가 그룹은 정비규정 대상 범위 결정 및 성능기준을 설정하는데 자문을 한다.

3. Risk Significant SSC선정 방법

PSA 결과를 이용한 Risk Significant SSC 선정 방법에는 여러 가지가 있는데, 대표적인 방법이 중요도를 이용한 방법이다. 그러나 현재 사용하고 있는 중요도 방법을 사용하여 정비규정에 적용하면, 경우에 따라서는 Risk Significant SSC로 선정되어야 할 SSC가 누락되는 경우가 발생할 수 있다. 그러므로 NUMARC 93-01에서는 어떤 SSC가 RAW(Risk Achievement worth), RRW(Risk Reduction Worth) 또는 CDF(Core Damage Frequency)의 세 가지 Risk Significant SSC 선정기준에 하나라도 속하면 Risk Significant SSC로 선정한다. 이에 본 논문에서는 SSC의 고장 확률을 포함하는 중요도인 ERAW(Effective RAW) 사용을 제안한다.

RAW 중요도는 계통이나 기기의 실패 경향을 포함하지 않는다. 그러므로 기존의 RAW는 고장이 거의 일어나지 않을 기기의 RAW가 높게 나타나는데 고장이 일어날 확률을 RAW 값에 곱하여 그 기기의 중요도를 다루는 방법을 고려하였다. 이런 개념은 $I_{(w)}$(weld inspection importance measure) [5]와 같이 노심손상확률에 근거하여 계통 중요도 결정을 위해 특정 위험도 척도로 사용된 예가 있다. 그러므로 같은 맥락에서 정비 규정에서도 ERAW를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$ERAW_i = P_i * RAW_{i(s)}$$

여기서, P_i는 계통 또는 기기 i의 고장 확률

고장확률이 큰 기기 A가 고장이 났을 때 위험도에 미치는 영향도 크면 그 기기는 중요하다. 그러나 고장확률이 낮은 기기 B가 고장이 났을 때 RAW는 클 수 있으나 ERAW는 작다. 예를 들어 P(A)를 0.01, P(B)를 0.001이라 가정하고 이 때의 RAW를 각각 1,2라 하면 ERAW는 각각 0.01과 0.002가 되어 RAW를 비교해 볼 때, P(B)의 RAW가 더 크지만 ERAW를 비교하면 반대로 P(A)의 값이 더 커진다. 따라서 기존의 RAW를 이용하여 Risk Significant SSC를 선정하면 기기 B가 선정되고 기기 A가 탈락될 수 있지만 ERAW를 사용하면 그 반대가 된다. 그러므로 ERAW를 사용하여 위험도에 미치는 영향이 큰 SSC를 선정하는 것이 정비규정 적용을 위해서는 적절할 것으로 예상된다. ERAW와 RAW를 사용했을 때, 계통의 중요도 순서가 바뀌는 것을 다음 표에서 확인 할 수 있다.

RAW와 ERAW로 구한 계통 중요도 비교

Ranking	RAW	ERAW
1	AFWS	AFWS
2	EPS	HPSI
3	MSS	EPS
4	HPSI	LPSI
5	ESFAS	CSS
6	HVAC	HVAC
7	LPSI	MSS
8	CSS	ESFAS
9	SCS	SCS
10	ECWS	CVCS
11	CVCS	SDS
12	SIT	MFWS
13	CCWS	ECWS
14	MFWS	CCWS
15	SDS	SIT
16	IAS	IAS

RAW에 의한 계통 중요도 선정 기준은 Reg. Guide 1.160에서 제시한 바와 같이 2를 넘는 RAW를 가진 계통을 선정하였고, ERAW에 대한 선정 기준은 2.0e-3으로 하였다. ERAW에 대한 검증 절차를 아직 수행하지 않았으므로 선정 기준 값은 임의로 RAW가 2 이상 되는 기본사건 수로 ERAW 선정기준을 정하였다. 이 선정기준은 앞으로 검증절차를 통해 확정될 것이다.

4. 계통 신뢰도 및 이용불능도 계산

성능기준(Performance Criteria)로 사용되는 일반적인 값은 이용불능도(unavailability)와 신뢰도(reliability)이다. 그러므로 성능기준 선정을 위해서는 적절한 신뢰도 및 이용불능도 계산 방법을 선택해야 한다. 이 때, 성능기준을 어떤 수준 즉, 기기, 트레인 또는 계통 수준으로 하느냐에 따라 계산 방법을 달리 할 수 있다.

고유의 성능기준은 발전소의 고장이력을 검토하여 결정해야 하지만 운전이력이 짧은 발전소에 대해서는 편의상 PSA가정이나 유사 발전소의 운전이력을 참고로 하여 성능기준을 결정할 수도 있다.

신뢰도 기준의 경우, 기능고장으로서 MPFF(Maintenance Preventable Functional Failure)만을 고려하는 방법도 있으나, 이 분석을 위한 인력과 시간이 많이 필요하므로 보수적으로 모든 기능 고장을 고려한 신뢰도를 계산한다.

울진 3,4호기에서는 기능고장횟수 제한 방식을 사용하여 신뢰도를 계산하는데, 신뢰도 성능기준은 0, 1, 2번의 고장이 일어날 확률을 고려하여 선택한다. 일반적으로 1번의 실패는 허용하고 2번의 실패는 허용하지 않는다. 근거는 대기 중의 SSC는 1주기 당 5번에서 20번의 기동요구를 받으며 기동실패확률은 0.01이다. 이항분포로 계산해 보면 0번 실패할 확률은 95% ~ 81.8%, 1번 실패할 확률은 4.8%~16.5%, 2번 실패할 확률은 0.1%~1.6%가 된다. 그러므로 2번 실패는 허용할 수 없다고 가정한다.

즉, 실패 수가 0인 경우에 대한 계산은 다음의 이항 분포식을 이용하여 얻는다.

$$f = \binom{n}{x} p^{x} (1-p)^{n-x}$$

여기서,

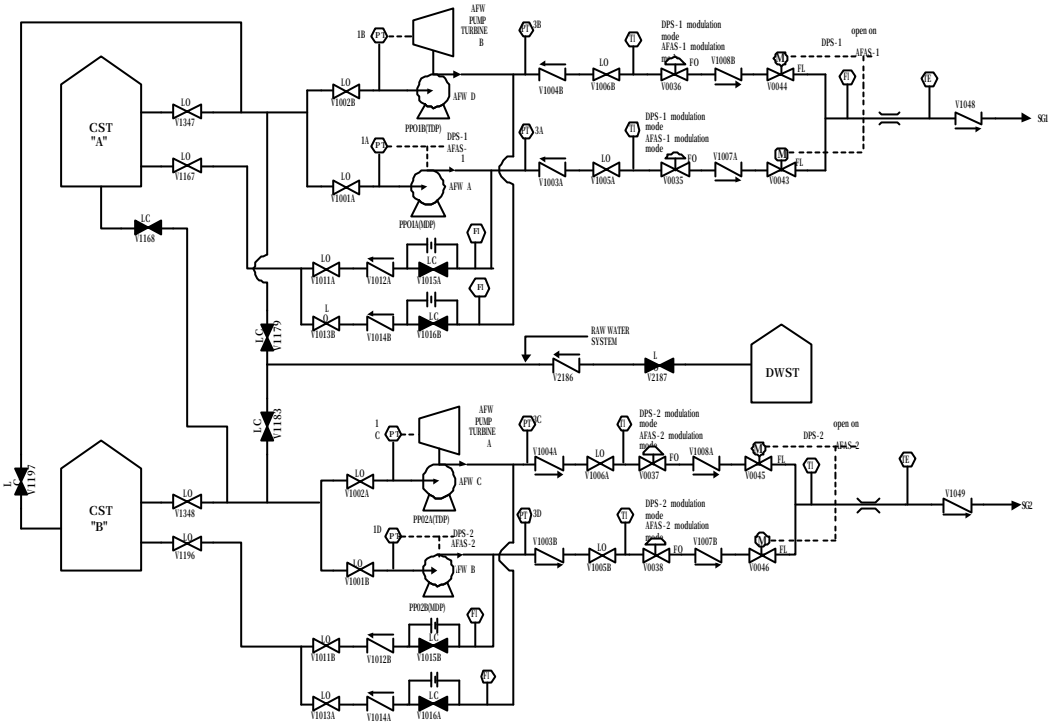
n = 요구 수, x = 실패 수, p = 요구 시 고장 확률

p를0.01이라 가정하고, n을 20으로 가정하면,

$$f = \binom{20}{0} 0.01^{0} (1-0.01)^{20-0} = 0.818$$

기능고장 횟수 제한 방식으로 성능 기준을 정하면, 실제 모니터링할 때 요구 수를 성공한 횟수로 나누어 기능의 신뢰도를 계산하지 않고 실패한 수만을 계산하여 성능을 모니터링 한다. 즉, 운전 자료에서 실패한 경우만을 고려하여 신뢰도 성능을 감시한다.

이용불능도의 경우, IPE 자료를 이용하여 정비이용불능도 분포의 90이나 95percentile을 성능기준으로 정한다. 그러나 사용한 변수의 정의와 계통경계가 정비규정과 다를 수 있으므로 이를 조정해야 하는 제약이 있으며 건설 중인 발전소에 대한 PSA에서는 일반데이터를 사용하므로 엄밀한 의미에서는 발전소의 성능을 의미한다고 볼 수 없으므로 성능기준 도출에 문제가 된다. 그러나 자료 여건상 불가피할 경우는 이런 방법도 허용되기도 한다.



울진 3,4호기 보조급수계통 단순계통도

위의 그림과 같이 구성된 울진 3,4호기 보조급수계통을 예제로 계통 이용불능도를 계산해 본다. 보조급수계통은 2대의 모터구동 펌프와 2대의 터빈 구동 펌프로 구성되어 있으며, 성공기준은 4대의 펌프 중 1대가 가동되어 증기 발생기로 냉각수를 공급하는 것이다.

현재, 한국원자력연구소에서는 영광 3,4호기에 대한 신뢰도 자료를 구축 중에 있으므로, 각 기기에 대한 이용불능도를 고장수목 모델에 입력하여 계통의 정비이용불능도를 계산할 수 있다. 이 때, 계통 이용불능도 계산에 사용하는 고장수목은 PSA모델에서 사용한 고장수목을 그대로 사용하지 않고, 상위 논리만을 사용하여 정비에 의한 이용불능만을 모델한다. 여기서는 간단히 펌프 부분과 밸브 부분으로 나누어 계통의 이용불능도를 계산해 보았다.

각 기기에 대한 이용불능도는 다음과 같은 방법으로 계산한다.

기기 이용불능도 = 이용불능시간 / 발전소 가동시간

펌프에 대해서는 영광 3,4호기에 대한 실제 운전자료를 사용하고 밸브에 대해서는 이용불능 시간을 40시간으로 가정하여 계산한 보조급수계통 이용불능도는 3.102e-6이었다. 여기서 발전소의 가동시간은 3주기 동안으로 22752시간으로 하였다.

5. 결론 및 토의

실제 발전소 계통은 약 110여 개 정도가 있다. 그러나 현재 국내 발전소의 PSA수행은 안전관련 계통 및 이들을 보조하는 계통에 대해 약 20여 개의 일부 계통만을 모델하였으므로 정비규정 범위에 포함되는 다른 계통에 대한 선정 및 분석을 위해서는 전문가 그룹의 의견을 따라야 한다. 전문가 그룹은 정비규정 적용을 위한 범위 결정 뿐 아니라 Risk Significant SSC선정과 성능기준을 결정하는 데에도 중요한 역할을 담당한다.

Risk Significant SSC를 선정할 때 기존에 사용해 온 중요도 분석 방법은 사용 용도에 따라 제약이 있을 수 있다. 특히, 정비규정의 경우에 있어서는 어떤 기기나 계통의 성공 또는 실패인 경우만을 고려하여 분석하는 RAW나 RRW를 사용하면, 신뢰도가 상대적으로 높으면 Risk Significant SSC로 선정될 확률이 커지고, 그 반대의 경우에는 실제로는 Risk Significant SSC로 선정되어야 할 SSC가 Risk Significant SSC 목록에서 누락될 수도 있다. 그러므로 본 논문에서는 계통이나 기기의 실패 경향을 포함할 수 있는 중요도 계산 방법인 ERAW를 사용하여 RAW를 이용한 계통 중요도 순위를 비교하여 변화가 있음을 보였다.

현 시점에서 정비규정 적용을 위한 성능기준을 선정하기 위해 기기 및 계통 이용불능도 계산방법과 기능고장 횟수 제한 방식을 이용한 신뢰도를 이용하는 방법을 제안했다. 또한 성능기준과 비교할 발전소의 현재성능은 발전소의 재장전 주기 2주기 기간 또는 36개월 중 짧은 기간 동안의 발전소 이력 자료로 계산된다. 그러나 운전 이력이 없는 신규 발전소에 대한 현재 성능 계산을 할 때에는 전문가 판단을 근거로 한다. 그러나 이러한 자료로 구한 성능은 고유 발전소 성능이라 할 수 없으므로, 앞으로 정비규정 적용을 위해서는 체계적으로 정비규정에 필요한 발전소자료를 수집하는 시스템의 구축이 필요할 것이다.

Acknowledgment

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 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. Truong V. Vo, Bryan F. Gore, Elizabeth J. Eschbach, Frederic A. Simonen, "Probabilistic Risk Assessment Based Guidance for piping in-Service inspection", Nuclear Technology Vol 88, 1989. 10, Page 13 2
6. 김길유, 김태운, 진영호, 홍승열, "정비규정의 국내 원전 적용 첫 타당성 연구", 한국원자력학회, '98추계학술발표회, 1998, 10