

정비규정의 국내 원전 적용 첫 타당성 연구

The First Feasibility Study of Maintenance Rule Application in Korean NPP

김길유, 김태운, 진영호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

홍승열

진력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-6

요약

국내 영광 3,4 호기 비상디젤발전기를 미국 정비 규정에 맞게 운영할 수 있는지를 검토하여 보았다. 영광 3,4호기 비상디젤발전기는 Risk Significant 계통으로 신뢰도는 0.95, 정비이용불능도는 0.006의 성능기준을 설정하였다. 또, 신뢰도 값에서의 Trigger 값은 NUMARC 87-00의 값을 사용하여도 별 무리가 없으며 정비이용불능도에서는 1차 Trigger 값을 성능 기준치의 75%인 0.0045로 정하였다. 연구 결과 영광 3,4 호기는 미국 정비 규정으로 충분히 운영할 수 있음을 밝혔고 어떻게 정비규정을 이행해야 할 것인지 제시하였다.

Abstract

U.S. Maintenance Rule (MRule), which was effective July 1996 in U.S.A., was not officially adopted in Korea by Korean nuclear regulatory agency. However, since many Probabilistic Safety Assessments and Individual Plant Examinations(IPE) have been performed for Korean Nuclear Power Plants (NPPs), the philosophy and usefulness of the MRule as well as performance-based regulation are being acceptable. The first feasibility study to apply U.S. MRule to Korea NPPs was performed at YGN 3,4 Emergency Diesel Generator (EDG). The MRule was applied to the EDG of YGN 3,4 with the following NUMARC 93-01 procedure. Since the Station Blackout (SBO) accident is an important accident sequence in the NPPs risk point of view and the reliability of EDG plays very important role in the SBO accident, the SDG should be one of risk significant SSCs which should be under MRule. The reliability 0.95 of EDG was selected as a performance criterion according to USA SBO rule. Unavailability 0.006 was selected as another performance criterion reflecting IPE data. Also, trigger values were selected for reliability and availability, respectively. Actual performance values were compared with the performance criteria. If the performance is not good, then the EDG is moved from MRule (a)(2) to (a)(1) items. The performance of the EDG in (a)(1) should be monitored to keep the performance goals. The MRule approach can be smoothly applied to the test and maintenance of EDG of YGN 3,4. The corrective action recommended in NUMARC 87-00 can be well used as a corrective action in (a)(1) of MRule.

1. 서론

정비규정 (Maintenance Rule: 10 CFR50.65)¹이란 미국에서 5년간의 준비 기간을 각 원전 사업자에게 주고 1996년 7월 10일을 기해 시행에 들어 간 미국 원전 모두에 적용되는 정비 관련 규제조치이다. 산업체에서는 이에 대한 해석 및 준비 지침으로 NUMARC (현재는 NEI로 이름 변경)을 중심으로 1993년에 NUMARC 93-01²을 발표하였으며 NRC는 NUMARC 93-01의 내용을 승인하는 내용을 Reg. Guide 1.160³으로 발표하였다.

각 발전소마다 원하는 안전 준위가 성취될 수 있도록 하기 위해 상세한 규정 또는 규범을 정해 놓고 사업자가 이를 지키는지의 여부를 심사하는 것을 처방적 규제 (Prescriptive Regulation)라고 하고, 사업자와 규제기관이 객관적인 성능목표를 정해 놓고서, 신청된 원전이 성능목표를 만족하고 있는지의 여부를 심사하는 것이 성능기준 규제(Performance-Based Regulation)라고 하면, 정비규정은 각 원전 사업자가 효과적으로 정비를 수행하고 있는지를 규제하는 조치로서 성능기준 규제에 해당한다.

국내에서는 아직 미국의 정비규정을 적용한 적은 없으며 그 효용성, 방법론을 여러 기관에서 연구하는 단계이다. 그러나, 우리나라는 많은 원전의 확률론적 안전성 평가와 IPE를 수행하여 왔기 때문에 성능기준 규제인 정비규정을 이행하기가 쉽기 때문에 어떤 형태로든 앞으로 수용할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 이러한 미국의 정비규정을 국내에 적용할 수 있는지의 여부를 검토하고자 하며 적용할 때의 방법론을 기술하였다. 정비규정을 적용할 계통은 영광원전 3.4 비상디젤발전기로 현재 신뢰도 향상 및 주기개선 연구를 한진, 한기공, 원자력연구소가 수행하고 있는 계통이다.

2. 본론

2.1 정비규정 내용

미국 정비규정(10CFR50.65)의 내용은 매우 짧으며 일부를 요약하면 다음과 같다.

(a) (1)

- SSC의 성능이나 상태를 운전면허자가 설정한 목표를 기준으로 Monitoring 해야 한다. 목표는 안전성에 부합되고 산업계의 운전 경험을 고려해야 한다. 성능이나 상태가 목표에 미달하면 적절한 시정조치(corrective action)을 취해야 한다.

(2)

- 성능이나 상태가 적절한 예방정비에 의해 효과적으로 조절되는 SSC는 (a)(1)항 처럼 monitoring이 요구되지 않는다.

(3)

- 성능 및 상태 감시와 관련 목표치, 그리고 예방정비 행위를 적어도 매 재장전 주기마다 평가하여야 한다.
- 신뢰도와 이용불능도는 균형을 이루어야 하고 정비이용불능 기기에 의한 안전 기능의 성능에 관한 전반적인 영향을 평가할 수 있어야 한다.

2.2 정비규정 이행방법

위의 간단한 정비규정을 자세히 해석한 것이 NUMARC 93-01이며 대부분의 미국 원전들은 NUMARC93-01의 정비규정 이행방법을 이용하여 정비규정을 대처하였다. 본 논문도 NUMARC 93-01의 정비규정 이행방법 및 절차를 준용하여 영광원전 3.4 호기 비상디젤발전기에 정비규정을 적용할 수 있는지 다음과 같이 검토하였다.

절차 1: 정비규정을 적용할 SSC(system, structure, component)선정

정비규정을 적용할 SSC는 우선 안전관련 SSC이면 되는데 비상디젤발전기는 대표적인 안전 관련 계통이므로 정비규정을 적용할 SSC에 해당.

절차 2: Risk Significant SSC 여부

정비규정 적용 SSC중 Risk Significant SSC인지 판별하여 Risk Significant SSC이면 개별적 성능기준을 정해주어야 하며 Non-Risk Significant SSC이면 개별적 성능 기준을 부여하지 않고 발전소 단위의 성능기준을 만족시키는지 여부를 검토하기만 하면 된다.

Risk Significant 를 설정하는 방법은 아래와 같이 RRW (Risk Reduction Worth), CDF(Core Damage Frequency), RAW(Risk Achievement Worth)를 이용하는 방법이 있다.

(㉠) Risk Reduction Worth

- 각 SSC의 RRW 계산
- Maintenance와 관계 없는 RRW는 제거 (예, 운전원 실수, 외부사건, 초기 사건)
- Maintenance 관련 RRW 총합으로 normalize 한 후 내림차순으로 정렬 후 각 SSC의 RRW누계가 99 %가 되는 SSC들을 expert panel에 제출 (또는, $RRW > 1.005$ 가 되는 SSC들을 expert panel에 제출)

(㉡) Core Damage Frequency Contribution

- 내림차순으로 정렬된 cut set 들의 합이 90%를 이룰 때 이에 속한 cutsets에 포함된 SSC는 Risk Significant SSC로 분류

(㉢) Risk Achievement Worth

- $RAW > 2$ 인 SSC

영광 3.4 호기 PSA 보고서⁴의 Table 1-3.3 “ Top 100 minimal cutsets”에 상위 85%의 cutsets이 제시되어 있고 이중 비상디젤발전기가 “EGDG*****” 형태로 포함되어 있으므로 위의 (㉡) 방법을 충족하며 또 같은 보고서 Table 1-3.4의 “Event Importance Information”에 의하면 비상디젤발전기의 RAW가 2보다 크므로 (㉢) 기준을 만족시키므로 영광 3.4 호기 비상디젤발전기는 Risk Significant한 계통이다. 또, 원전 노심손상사고를 초래하는 중요 사고경위인 Station Black Out (SBO)사고에서 핵심역할을 하는 계통이 비상디젤발전기이며 이 계통의 중요성으로 미국에서는 SBO Rule⁵로 비상디젤발전기 신뢰도를 0.95 나 0.975를 유지하게 되어 있을 정도로 (SBO Rule을 영광 3,4에 적용하면 비상디젤발전기 신뢰도 목표치는 0.95에 해당) 원전의 안전성에 중요한 계통이므로 당연히 Risk Significant 한 계통이다.

절차 3: 성능기준 설정

Risk Significant 계통인 영광 3,4 비상디젤발전기에 실제 사용되는 성능기준은 정비이용불능도 및 신뢰도이다.

Reg. Guide 1.160에 명시되었듯이 비상디젤발전기의 정비규정 적용시 성능기준은 Station Blackout Rule (10CFR 50.63)의 신뢰도 목표치를 사용할 수 있으므로 영광 3,4 호기 비상디젤발전기 성능 기준치를 Station Blackout Rule 의 0.95로 정한다.

또, “비상디젤발전기 정비이용불능도는 IPE(Individual Plant Examination) 수행시 가정되었었고 이 값은 각 원전 특유의(Plant-specific) 비상디젤발전기 정비이용불능도와 비교해야하며 이 값은 정비규정의 비상디젤발전기 목표치나 성능 기준으로 사용할 수 있다.”라는 Reg. Guide 1.160에 따라 검토해보면, 영광 3,4 호기 IPE 수행 시 사용한 비상디젤발전기 정비이용불능도는 0.006이고, 현재까지의 영광 3 호기 (3년간)의 실제 이용불능도는 0.006에 근접한 값을 나타내고 영광 4호기(2년간)는 이 값의 10% 수준을 나타내고 있으므로, 영광 3,4호기 비상디젤발전기의 성능기준의 하나인 정비이용불능도 목표치는 0.006으로 정할 수 있다.

절차 4: 성능기준과 현재의 성능 비교

성능기준과 현재의 성능 비교시 현재의 성능은, 최소한 발전소의 재장전 주기 2 cycle 기간이나 36개월중 적은 기간 동안의 발전소 이력 자료를 이용한다². 또, 비교하여 적합한 성능을 가진 것으로 결정된 모든 risk significant SSC는 (a)(2)로 분류되며 부적합 SSC는 (a)(1)로 분류된다². 따라서, 위의 절차 3에서 정한 영광 3,4호기 비상디젤발전기의 성능기준과 최근의 재장전 주기 2 cycle 성능을 비교하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 영광 3,4호기 비상디젤발전기의 성능기준과 현재 성능

	주기 시작일	주기 종료일	신뢰도 목표치	실제 신뢰도	정비이용 불능도 목표치	실제 정비이용 불능도
영광 3호기 A&B	96/2/21	98/4/20	0.950	0.956	0.0060	0.011
영광 4호기 A&B	96/1/1	97/11/9	0.950	1.0	0.0060	0.0009

따라서 신뢰도 성능은 영광 3,4 호기 비상디젤발전기 모두 성능기준을 만족시키나, 정비이용불능도는 영광 3호기의 경우 성능기준을 만족시키지 못하고 있다. 그러므로 정비규정에 의하면 영광 3호기 비상디젤발전기는 (a) (1) 에 속하는 계통으로 옮겨서 특별히 취급해야 한다. 즉, (a)(1) 항목은 원전 운전면허자가 설정한 목표를 기준으로 monitoring 되어야 하고, 개선된 프로그램으로 (현재 영광 3,4 호기 비상디젤발전기 신뢰도 향상 프로그램이 진행 중에 있으며 NUMARC 87-00⁶ 방법을 적용한 신뢰도 목표 및 조치사항을 적용하고자 하고 있다.) 향후 영광 3호기의 정비이용불능도가 향상되면 다시 (a)(2) 에 속하는 계통이 되어 가벼운 예방정비만을 수행하면 될 것이다.

절차 5: Trigger 값 설정

성능이 저하되어 성능이 어떤 특정값 (Trigger 값)에 도달하면 어떤 조치를 취하라는 Trigger 값을 설정한다. 영광 3,4 비상디젤발전기 정비 이용 불능도 Trigger 값은 아래 표 2와 같으며 이때 정비 이용 불능도의 제 1 trigger 값은 정비 이용불능도 성능 기준치의 75%를 이용하였다.

표 2. 영광 3,4 비상디젤발전기 정비 이용 불능도 Trigger 값

	정비 이용 불능도
성능 기준치	0.006
제1 trigger 값	0.0045
제2 trigger 값	0.006

정비 이용불능도가 제 1 trigger 값보다 커지면 이때의 정비 이용불능도를 매달 알리는 비상디젤발전기 성능 보고서에 노랑색으로 표시하며 Expert Panel에 회부하여 (a)(1) 편입 여부를 결정한다.

정비 이용불능도가 제 2 trigger 값보다 커지면 이때의 정비 이용불능도를 매달 알리는 비상디젤발전기 성능 보고서에 빨간색으로 표시하며 비상디젤발전기를 (a)(1)에 계속 존제시키거나 새로 (a)(1)로 편입한다.

영광 3,4 비상디젤발전기 신뢰도 Trigger 값은 기능 고장 횟수 제한 방식으로 정한다. 즉, 신뢰도 성능 trigger 값은 0번, 1번, 2번, 3번, 4번 등의 고장이 일어날 확률을 고려하여 0번, 1번, 2번, 3번, 4번 등에서 선택한다.

비상디젤발전기의 주어진 요구(예, 기동요구)에 일어나는 실패는 이항 (binomial) 분포를 이룬다고 가정하면 비상디젤발전기 신뢰도 목표가 0.95일 때 20과 50회의 요구횟수 중에 일어나는 실패 확률은 다음 표 3과 같다. 예를 들면, 표 3에서 요구횟수가 20일 때 2번 실패할 확률이 18.8%이다.

표 3. 신뢰도가 0.95일때 이항분포 값

실패수	요구횟수=20	요구횟수=50
0	35.8%	7.69%
1	37.7%	20.3%
2	18.8%	26.1%
3	5.95%	22.0%
4	1.33%	13.6%
5		6.58%
6		2.60%

위 표에서 요구횟수가 20회 일 때 1번 실패가 제일 많이 일어나지만 3회까지도 실패가 적지 않게 일어날 수 있다. 그러므로 요구횟수가 20회 일 때 3회 실패까지는 신뢰도가 0.95인 비상디젤발전기에서는 있을 수 있는 경우로서 별 문제가 안되고 실패횟수가 4회 이상일 경우에는 그 비상디젤발전기는 문제가 있는 것으로 판단할 수가 있다. 그러므로 요구횟수 20회 일 때의 Trigger 값은 3이 되며 이 trigger 값보다 실패횟수가 커지면 다음 표 4와 같은 조치를 취해야 할 것이다. 또한, 표 3 에서 알 수 있듯이 요구횟수가 50일 때에 5번 실패까지는 일어날 확률이 적지 않으므로 이때의 Trigger 값은 5로 잡는다. 같은 방법으로 100회 요구시의 Trigger 값은 8로 설정되었다. 이상의 Trigger 값은 본 정비규정에서 사용될 것이나 NUMARC 87-00에 정한 Trigger 값과 일치 한다. 즉, NUMARC 87-00에 정한 Trigger 값이 정비규정의 Trigger 설정 논리와 일치한다.

한편, NUMARC 87-00에 의하면 다음 표 4과 같이 Trigger 초과시의 조치사항이 나와 있다.

표 4. Trigger 초과시의 조치사항

초과 없음	1개 초과	50&100회 요구 초과
1. 고장근본원인 분석 2. 분석결과 이행	1. 고장근본원인 분석 2. 과거 실패사례 검토 3. 고장정비이력 평가 4. 고장형태 판별 5. 검토결과 이행	1. 고장근본원인 분석 2. 과거 실패사례 검토 3. 고장정비이력 평가 4. 고장형태 판별 5. 신뢰도 프로그램 수정 6. 검토결과 이행

따라서 비상디젤발전기가 성능이 좋을 때, 즉, (a)(2)에 있을 때에는 표 4의 초과 없음을 수행하고, 성능이 저하되어 실패 횟수가 1개 이상 초과 시는 (a)(1)로 옮겨서 표 4의 초과 시 조치사항을 수행하면 정비규정 방침과 일치하게 될 것이다.

3. 결론

영광 3,4호기 비상디젤발전기 운영 및 정비에 미국의 정비규정을 적용할 수 있는지 정비규정 적용 절차에 따라 검토하여 보았다. 영광 3,4호기 비상디젤발전기는 Risk Significant 계통으로 개별적 성능기준을 가지며 신뢰도는 0.95, 정비이용불능도는 0.006을 가진다. 또, 성능이 저하되어 성능이 어떤 특정값 (Trigger 값)에 도달하면 어떤 조치를 취하라는 Trigger 값을 설정하였으며 신뢰도 값에서의 Trigger 값은 NUMARC 87-00의 값을 사용하여도 이론적으로 무리가 없으며 정비이용불능도에서는 1차 Trigger 값을 성능 기준치의 75%인 0.0045로 정하였다. Trigger 값을 초과하면 (a)(2)항목에서 (a)(1)항목으로 옮겨 보다 엄격한 감시 및 조치를 요구하는 정비 규정과 Trigger 값을 초과하면 상응하는 조치를 취하는 NUMARC 87-00과는 일맥상통하는 조치로서 정비규정 내에서 NUMARC 87-00 조치를 적용할 수가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. U.S. NRC, "Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", 10 CFR 50.65, July 1991
2. NUMARC 93-01 "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants"
3. U.S. NRC, Regulatory Guide 1.160, "Monitoring The Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", June 1993
4. Jo, Y.G. 외 9인, "Final Level 1 Probabilistic Risk Assessment Update For Yonggwang Nuclear Units 3 and 4, KAERI, July 1993.
5. U.S. Federal Register, Vol. 53, No. 119, Nuclear Regulatory Commission, 10 CFR Part 50 Section 63, Station Blackout, June 21, 1988.
6. NUMARC 87-00, Rev. 1, "Guidelines and Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactor"

