

가동원전 전력계통 케이블의 경년열화평가 방안 연구 Methodology of Aging Evaluation of Power Cables in Nuclear Power Plants

한성흠, 임우상, 김병섭
한국수력원자력(주) 대전시 유성구 문지동 103-16

1. 개요

원자력법에 의하면 국내 모든 가동원전은 10년 주기로 안전성평가를 이행하도록 요구하고 있다. 2001년 5월 고리 1호기에 대한 주기적 안전성평가(PSR, Periodic Safety Review)를 시작으로 월성 1호기와 고리 2,3,4호기의 주기적 안전성평가를 수행하였으며, 현재 영광 1,2호기 및 영광 3,4호기의 주기적 안전성평가를 수행하고 있다. 주기적 안전성평가 중 전력계통의 케이블 평가는 첫째, 케이블의 물리적 상태를 확인하여 현재 유효한 기록이 전력계통의 상태를 정확히 나타내고 있는지를 확인하는 것이며 둘째, 요구되는 안전여유도를 유지하기 위해 전력계통 케이블의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지를 분석하고 향후 안전운전을 위해 케이블의 경년열화 관리계획이 적절히 확립되어 있는지를 확인하고 평가하는 것이다

2. 평가범위 및 방법

2.1 평가범위

케이블의 평가항목은 경년열화 평가대상 선정기준을 근거로 각 계통의 기능을 분석하여 안전관련 등급에 해당되는 Q-등급, T-등급 외에 전기등급 IEEE Std. 308에 따른 전기 1급(Class-1E) 여부를 선정기준으로 하고, 전기 1급 케이블로서 케이블의 절연체, 자켓 및 커넥터 등이 평가 범위에 포함된다

2.2 평가방법

전력계통 케이블 경년열화평가는 전력계통 설비의 안전여유도를 유지하기 위하여 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지의 여부와 향후 원자력 발전소 안전운전을 위하여 적절한 경년열화 관리계획이 확립되어 있는지를 확인한다. 이를 위해 사용되는 평가방법은 다음과 같다.

- 국내원전에 적용된 국내법을 포함한 관련 규제요건 및 기술기준 검토
- 현재 물리적 상태, 경년열화평가 및 관리 관점에서 국내외 운전경험 및 연구결과의 반영이 요구되는 사항 검토

- 설계, 제작, 설계변경, 시험, 검사 및 보수 관련 자료분석과 현장점검을 통한 현재 물리적 상태 확인
- 유효한 기록과 설비 상태의 불일치 사항 확인
- 경년열화현상 분석 및 평가
- 차기 주기적 안전성평가 까지 설비의 고유기능 및 안전운전을 유지하기 위한 안전여유도 확인
- 발전소 운영 경년열화관리계획의 적절성 검토

3. 평가내용

고리 3,4호기 이후의 국내원전의 안전관련 케이블은 주로 EPR 및 XLPE 절연재질을 사용하였다. 초기 발전소 설계 및 케이블 재질 선정시 포함된 보수성으로 인해 대다수의 케이블 자켓과 절연체는 설계수명 40년 동안 모든 환경조건에서도 고유의 안전기능을 충분히 수행할 수 있도록 내환경검증(10CFR50.49)을 수행하였다. 따라서 초기분석에 사용된 내환경검증 방법과 동일한 절차 및 기준에 따라 잔여시간을 보수적으로 예측할 수 있다. 열노화 평가에서는 공간접근법과 아레니우스 모델을 병행한다.

3.1 공간접근법(space approach)

공간접근법은 발전소를 환경지역으로 구분한 후 각 구역 내의 설치된 케이블을 그룹화한 후 이중에서 가장 취약한 절연재질을 선정한 후 실제 환경조건(온도, 방사선 등)과 기준한계치를 비교하여 수명을 결정하는 방식이다. 이 방법은 NUREG-1800~1801을 기초로 미국의 WOG GTR 과 CCNPP, Oconee, Turkey Point 등의 인허가갱신 보고서에서 활용된 방법이다. 가령 90°C 운전조건으로 설계된 케이블이 실제 공간온도가 50°C를 초과하지 않을 때 NRC는 연장운전을 허용하고 있다. 공간온도와 케이블 자체 온도상승 값을 합하여 절연재질 한계온도를 초과하지 않아야 한다(공간온도+저항열에 의한 온도상승 < 60년 절연재질 한계온도).

3.2 아레니우스 모델에 의한 잔여수명평가

NUREG-0588에서 제시된 아레니우스 모델에 의한 잔여수명은 케이블 시험 데이터 온도점을 IEEE Std. 101-1987의 통계적 처리 방법에 의한

선형 회귀 분석(linear regression)을 사용하여 절연 재질의 수명과 온도간의 추정 관계를 계산할 수 있다. 이에 대한 관계식은 식 3.2-1 과 같은 형태로 표시할 수 있다.

$$\text{Log}(L) = A + B/T_s \quad (3.2-1)$$

Log(L) = 평균 Log 수명

A = 상수(절연재질, 시험방법 등에 의존)

B = $E_a/(2.303k)$ (절연재질, 시험방법 등에 의존)

E_a = 활성화에너지(eV)

$k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K(Boltzmann 상수)

T_s = 운전온도(Kelvin)

계수 A 와 B 는 시험데이터에 대해서 선형 회귀 분석을 수행함으로써 구할 수 있으며 이에 대한 식은 3.2-2, 3.2-3 과 같고, 그림 3.2-1 은 케이블 잔여수명평가 결과의 예이다.

$$B = \frac{N\sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N\sum(X^2) - (\sum X)^2} \quad (3.2-2)$$

$$A = \frac{[\sum Y - B(\sum X)]}{N} \quad (3.2-3)$$

X = 1/T (Kelvin), Y = Log₁₀ L (시험시간)

N = 시험데이터 수

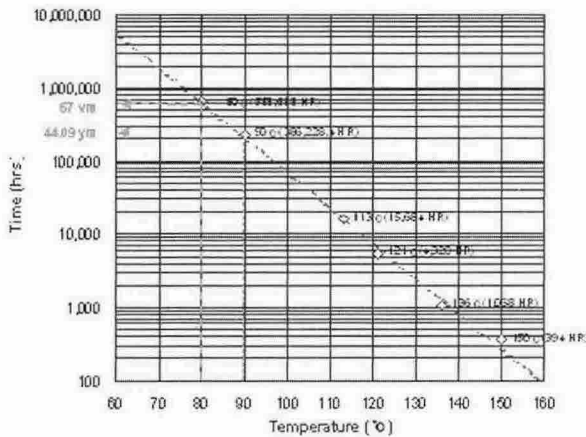


그림 3.2-1 케이블 잔여수명평가 결과의 예

4. 케이블 경년열화관리

원전 전력케이블은 경년열화 영향을 받음 에도 불구하고 국내원전에서 운용중인 절차서는 이에 대한 관리프로그램이 없다. 가혹 환경지역에 설치된 전기 1 급 케이블은 열과 방사선에 의해서 절연체, 자켓의 전기적 및 기계적 성질을 변화시킬 수 있으므로 안전성 증진을 위한 관리 프로그램이 필요하다. 가혹환경 지역에 설치된 전력 및 I&C 케이블에 대해서는 주기적인 환경 조건(열, 방사선, 습분) 감시와 육안검사에 대한 신규 프로그램 수립이 필요하다.

5. 결 론

주기적안전성평가의 전력계통 케이블에 대한 평가범위 및 평가방법 그리고 세부 평가기법 등을 기술하였으며, 이를 바탕으로 가동원전의 전력 계통 케이블에 대한 주기적안전성평가 방안 및 경년 열화관리를 체계적으로 수립하여 원자력 발전소 안전운전을 위한 적절한 경년열화관리 계획이 효율적으로 확립되고 있는지를 확인하고, 보다 신뢰성 있는 발전소 유지 관리와 가동 원전의 건전성 및 안전성 확보에 기여 하고자 한다.

참조문헌

- [1] 한수원(주) 고리원자력본부 제 2 발전소 “경년열화평가보고서”, 2004
- [2] 한전 전력연구원, “케이블 원전수명관리연구 (□) 최종보고서”, 2001.
- [3] KINS, “안전관련 전기설비의 경년열화에 관한 기술현황 분석”, 2001. 9
- [4] US NRC, “Standard Review Plan for the Review of LR application for NPP”, September 1997.
- [5] NUREG/CR-6490, “Nuclear Power Plant Generic Aging Lessons Learned(GALL), 2000.
- [6] EPRI TR-111030, “Oconee Nuclear Station Application for Renewed Operating Licenses”, 1998.
- [7] EPRI TR-111031, “Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Licenses Renewal Application”, 1998.
- [8] FPL, “Application for Renewed Operating Licenses, Turkey Point 3 & 4”, 2000.