

가동원전 전력계통의 주기적안전성평가 사례고찰

A Study on the Periodic Safety Review of Electrical System for Operating Nuclear Power Plants

임우상, 김병섭, 노명섭
한국수력원자력(주)
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

현재 국내에서는 관련 법규에 따라 10년을 주기로 원전의 주기적 안전성평가(PSR)가 수행되고 있다. 본 논문에서는 가동중인 원전의 전력계통을 대상으로 수행한 주기적안전성평가 사례를 통하여 수행 방법론 및 전력계통의 경년열화관리에 대한 현황을 소개하였다. 이번 평가에서는 특히 확률론적 방법을 사용한 능동형기기에 대한 평가가 수행되었으며, 전체적으로 향후 10년간 경년열화 관점에서 전력계통의 안전성을 유지하기에 적절함을 확인하였다.

Abstract

In Korea, the Periodic Safety Review(PSR) is being performed one by one for all the operating nuclear power plants in compliance with domestic nuclear regulations. This paper is to introduce the methodology of PSR and the status of the aging management programs for the electrical system of operating nuclear power plants. Especially active components performance evaluation using probabilistic method is added in this PSR. It is found that aging management programs for electrical system are adequate to maintain plant safety during next ten years.

1. 서 론

전력계통 설비의 경년열화평가의 목적은 원자력법시행령 제42조의3(주기적안전성평가의 내용) 및 시행규칙 제19조의2(주기적안전성평가의 세부내용)에 의한 주기적안전성평가의 일환으로서 첫째, 전력계통 설비의 물리적 상태를 확인하여 현재 유효한 기록이 전력계통

의 상태를 정확히 나타내고 있는지를 확인하는 것이며 둘째, 요구되는 안전여유를 유지하기 위해 전력계통 설비의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지를 분석하고 향후 설비의 안전운전을 위해 경년열화 관리계획이 적절히 확립되어 있는지를 확인하는 것이다.

이를 위하여 최근 유효한 기술기준을 조사하고 전력계통 설비관련 요건을 만족하고 적절하게 유지 관리되고 있는지를 확인하게 되며, 전력계통 설비가 차기 주기적안전성평가 시기까지 고유기능을 유지하고 안전하게 운영될 수 있는지를 확인하기 위해 운전, 시험, 정비 등 경년열화관리 프로그램이 적절한지를 검토하게 된다. 본 논문에서는 고리3,4호기를 대상으로 전력계통의 주기적안전성평가 사례를 살펴보고자 한다.

2. 평가범위 및 방법

2.1 대상기기 선정

평가대상 계통·기기·구조물을 선정하기 위해 계통별 기능 중에서 안전관련 계통, 구조물, 기기들과 비안전 관련으로서 안전에 영향을 주는 계통·기기·구조물과 관련 있는 기능을 선정기준으로 하였다. 이렇게 하여 약 19개의 계통에 걸쳐 약 221개의 전력계통 설비 중에서 품질등급 Q, T와 IEEE Std. 308에 따른 전기1급에 해당하는 7개 계통의 총 189개의 기기를 선정하였다.

이와 같이 선정된 기기들은 경년열화평가를 효율적으로 수행하기 위해서 전력계통 설비의 형식과 설치장소에 따라 스위치기어, 로드센터, 변압기, 전동기제어반, 인버터, 교류/직류 분전반, 충전기, 축전지, 전동기, 케이블, 케이블 트레이, 전선관, 전기관통부집합체 등 13개의 그룹으로 분류되었다. 전력계통 설비는 주요 건물에 그룹별로 설치되어 있고 환경조건도 유사하므로 중요도, 가혹환경, 운전조건 등의 조건에 따라 13개 그룹 41개 대표기기가 선정되었다. 전력설비중 케이블, 케이블 트레이, 전선관 및 전기관통부 등을 제외한 설비들은 모두 피동형과 능동형 부위가 존재한다. 이들 능동형 부위에 대해서는 계획예방정비, 품질보증 프로그램 및 가동중시험 규정에 따라 정비 및 감시되고 필요시 교체가 용이하므로 경년열화평가를 대신하여 정비성능 관점의 평가를 수행하였다.

2.2 평가방법

전력계통 설비 평가를 위하여 설계, 제작 자료와 운영허가일 이후부터 기기의 시험, 운전, 정비 등 운영 자료를 참조하고 유효한 기술기준을 근거로 하여 현재 물리적 상태를 확인하고 경년열화를 평가하였다. 케이블 및 전선로 등을 제외한 설비들은 피동형과 능동형 부위가 모두 존재하므로 경년열화평가와 성능평가로 구분하여 수행하였다. 경년열화평가는 전력계통 설비의 안전여유도를 유지하기 위하여 경년열화가 효과적으로 관리되고

있는지의 여부와 향후 원자력발전소 안전운전을 위하여 적절한 경년열화 관리계획이 확립되어 있는지를 확인하였다. 확률론적 성능평가는 전력계통 설비의 성능기준을 설정하고 성능평가 결과를 토대로 정비개선방안을 검토하였다.¹⁾ 사용된 평가방법을 정리하면 다음과 같다.

- 고리 3,4호기에 적용된 국내법을 포함한 관련 규제요건 및 기술기준 검토
- 현재 물리적 상태, 경년열화평가 및 관리 관점에서 국내외 운전경험 및 연구결과의 반영이 요구되는 사항 검토
- 평가대상 부속 계통·기기·구조물의 분류 및 선정
- 설계, 제작, 설계변경, 시험, 검사 및 보수관련 자료분석과 현장점검을 통한 현재 물리적 상태 확인
- 유효한 기록과 설비 상태의 불일치 사항 확인
- 경년열화현상 분석 및 평가
- 성능기준 설정 및 성능평가
- 차기 주기적안전성평가까지 설비의 고유기능 및 안전운전을 유지하기 위한 안전여유도 확인 및 미래상태 예측
- 발전소에 적용중인 경년열화 완화 및 관리계획의 적절성 검토
- 발전소 안전성 향상을 위한 개선사항 도출

3. 현재의 물리적 상태

평가에 적용된 기술기준은 2003년 12월 31일 현재 유효한 기술기준으로 하였다. 운전경험 및 연구결과 활용 상황에 있어서는 표준기행-03(국내원전 운전 및 정비경험 관리)이 작성된 1996년 이후부터 국내 원전의 운전 경험을 각 운전 및 정비절차서 등의 개정을 통해 체계적으로 반영하여 왔다. 특히 고리 3,4호기에서는 해외 손상사례 중 고장 발생률이 가장 높은 인버터의 신뢰성 향상을 위해 제어카드 교체와 자동전원절체스위치를 추가하여 운용 중에 있다. 이외에 운전년수 증가에 따라 성능 저하된 취약설비를 선정하여 중점관리하고 고리 1호기 환경영향손상경험을 반영하여 절연유 누출 환경영향평가를 수행하므로써 타호기의 운전경험을 잘 반영하고 있다. 연구결과 반영으로는 무정전 전원설비의 고조파 대책방안을 수립하여 운용 중에 있다.

전력계통의 현재 물리적 상태 평가는 설계 및 제작특성 그리고 시험, 검사, 운전, 정비 등 운영기록을 기초로 수행한 결과 안전에 필수적인 전기기기 및 케이블은 내환경검증 수행으로 인하여 설계수명기간동안 정상운전 또는 사고환경조건에 대한 고유기능을 확보됨을 확인하였다. 이외에 IEEE Std. 384-1977과 Reg. Guide-1.75에서 요구하는 안전등급 케이블간 이격거리 및 독립성 설계기준 등을 모두 만족하고 있으므로 제작 및 설계로 인한 현안사항은 없는 것으로 검토되었다. 전력계통은 주기적인 점검 및 관리 외에도 취약

설비에 대해 증점관리 하여 운영하고 있고 각종 기록사항에 대한 종합 검토와 발전소 현장점검을 수행한 결과 확인된 현안사항은 없는 것으로 확인되었다.

4. 피동형 기기의 경년열화평가

고리 3,4호기 전력설비에 대한 경년열화현상을 분석하였다. 선정된 전력설비의 평가를 위하여 ASME Sec. III App. W 분류에 따른 17개 경년열화기구와 전기적 특성을 고려한 기타 경년열화기구를 추가로 포함하였다. 분전설비 및 케이블의 경년열화현상 분석은 해외의 선행 연구결과(GALL(Generic Aging Lessons Learned), WOG GTR(Generic Technical Report), CCNPP(Calbert Cliff Nuclear Power Plant), Oconee, Turkey Point),^{2)~11)} 운전경험, 국내외 손상사례 등을 검토하여 발생 가능한 경년열화기구를 도출하였다. 이 결과 분전설비에서는 부식, 오염, 열노화, 습분, 마모, 진동의 6개 경년열화기구들이 도출되었다. 케이블에서는 열노화, 조사취화, 전기트리 및 절연저항감소 등 4개 경년열화기구를 도출되었으며, 전기관통부집합에서는 같이 열노화, 조사취화, 습도, 절연저항 감소 및 누설의 5개 경년열화기구들이 평가대상으로 도출되었다.

4.1 분전설비

분전설비(외함, 모선, 케이블 트레이, 전선관)에서 경년열화기구로 선정된 상기 6개 항목을 평가하기 위하여 NUREG-1800, 1801과 WOG GTR, CCNPP, Oconee, Turkey Point에서 일반적으로 적용한 육안점검을 중심으로 수행하였다. 도출된 경년열화기구에 대한 육안점검을 위해 총 4회에 걸쳐 원자로건물, 보조건물, 제어건물, 스위치기어건물 및 터빈건물 등에 설치된 분전설비를 대상으로 검사를 수행하였다. 분전설비는 부식에 의한 재료손실이 일반적으로 우려되는 사항이나 고유기능에 영향을 미칠만한 사항이 발견되지 않았다. 다만 상기 자료에서 제시하는 바와 같이 분전설비는 경년열화 영향을 받는 기기이며, 현재 운용중인 절차서에는 이에 해당되는 내용이 없어 부식에 의한 재료손실을 관리할 수 있는 육안점검 및 기기의 청결상태 유지를 위한 적절한 조치가 필요하다.

4.2 케이블

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 설계되었고 기기검증 프로그램에 따라 검증되었다. 따라서 케이블은 초기 분석에 사용된 내환경검증(10CFR50.49 : EQ) 방법과 동일한 절차 및 기준에 따라 잔여 시간을 보수적으로 예측할 수 있다. 고리 3, 4호기 케이블은 IEEE Std. 323-1974에 따라 내환경검증을 수행하였고 이에 대한 시험데이터가 확보되어 있다.

이에 따라 본 평가에서는 공간접근법(space approach)과 아레니우스 모델(Arrhenius

model)에 의한 평가를 병행하였다. 공간접근법은 발전소를 환경지역으로 구분한 후 각 구역 내의 설치된 케이블을 그룹화 하였고 이 중에서 가장 취약한 절연재질을 선정하여 실제 환경조건(온도, 방사선 등)과 기준한계치를 비교하여 수명을 결정하는 방식이다. 이 방법은 NUREG-1800~1801의 기초로 미국의 WOG GTR과 CCNPP, Oconee, Turkey Point 등의 운영허가갱신 신청보고서에서 활용된 방법이다. 가령 90℃ 운전조건으로 설계된 케이블이 실제 공간온도가 50℃를 초과하지 않을 때 NRC는 연장운전 획득을 허용하고 있다. 열노화에 대한 평가를 수행하기 위해 총 4회에 걸쳐 온도측정과 육안점검을 수행하였다. 평가결과 EPR 및 XLPE 절연재질 케이블은 60년 사용한계기준 온도인 68.3℃ 이하를 유지하고 있으므로 온도에 따른 케이블 열화에 대해서 차기 주기적안전성평가 시기까지 안전기능을 유지할 수 있다.

조사취화 평가방법은 정상시 조사선량과 설계기준사고(DBA)중의 냉각재상실사고(LOCA)시를 고려하여야 한다. 설계기준사고는 설계수명 경과후 LOCA가 발생한 것으로 가상하여 방사선을 조사하여 계산할 수 있다. 따라서 방사선조사는 정상시 총집적선량(total Integrated dose)과 사고시 집적선량(DBA)을 합한 값을 이용하여 계산한다. 방사선 조사선량 값은 발전소 운영중 정기적으로 측정된 값을 이용하였다. 평가결과 원자로건물 구역 중에서 최대 조사선량은 5000μSv/hr이며 이 값을 40년으로 환산하면 1.7E+07Rad이다. 설계기준에서 제시된 정상시 조사선량 1.0E+08Rad 보다 낮게 제시되었다. 고리 3,4호기 사고조사선량은 1.0E+08Rad이며 총 조사선량은 2.0E+08Rad이다. 따라서 40년간 계산된 총 조사선량은 1.17E+08Rad이고 허용기준인 2.0E+08Rad 보다 낮으므로 방사선에 따른 케이블 열화 관점에서 차기 주기적안전성평가 시까지 안전기능을 유지할 수 있다.

아레니우스 모델에 의한 잔여수명평가

NUREG-0588에서 제시된 아레니우스 모델의 의한 잔여수명은 초기분석에 사용된 방법과 동일한 내환경검증 프로그램을 이용하여 현재의 환경조건에 대하여 유효수명을 산출하였다. EQ 검증자료에 제시된 XLPE 케이블 시험데이터 점은 113℃, 121℃, 136℃ 및 150℃이고 이 시험데이터 점을 IEEE Std. 101-1987의 통계적 처리 방법에 의한 선형 회귀분석(linear regression)을 사용하여 절연재질의 수명과 온도간의 추정 관계를 계산할 수 있다. 이에 대한 관계식은 다음 식과 같이 절연재질의 화학반응속도와 온도의 형태로 표시될 수 있다.

$$\text{Log}(L) = A + \frac{B}{T_s}$$

여기서,

Log(L) = 평균 Log 수명

A = 상수(절연재질, 시험방법 등에 의존)

$B = E_a / (2.303k)$ (절연체질, 시험방법 등에 의존)

$E_a =$ 활성화에너지(eV)

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

$T_s =$ 운전온도(Kelvin) 이다.

계수 A와 B는 시험데이터에 대해서 선형 회귀분석을 수행함으로써 구할 수 있으며 이 시험데이터와 상기 식을 활용하여 케이블의 잔여수명을 계산하였고 보수적인 평가를 위해서 XLPE 케이블 시험데이터를 활용하였다. 계산결과는 다음과 같다.

$$B = \frac{4\sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{4\sum(X^2) - (\sum X)^2} = 6.9119 \times 10^3$$

$$A = \frac{[\sum Y - B(\sum X)]}{4} = -13.802$$

여기서,

$X = 1/T$ (Kelvin)

$Y = \text{Log}_{10} L$ (시험시간)

$N =$ 시험데이터 수

주요구역별 공간온도 측정결과 24°C~35°C의 범위이고 증기헤더실과 가압기 하부 등에서 이 온도를 초과할 수 있다. 이러한 구역에 설치된 일부 전력케이블은 저항손(ohmic heating)에 의한 도체 온도상승이 발생하여 국부적으로 공간온도보다 상승할 수 있으므로 운전조건, 부하전류, 저항 등과 같은 고유변수를 고려하여야 한다.

이에 대한 대안으로 케이블 표면온도측정 장치를 이용한 데이터 취득방법이 있지만 이에 대한 데이터가 존재하지 않아 고리 1호기에서 측정한(1999.8~2001.1) 증기헤더실, 가압기 하부지역 및 케이블 포설실의 일반데이터(generic data)를 활용하였다. 표면온도 측정값은 증기헤더실 68°C, 가압기하부는 38°C이다. 일반적으로 케이블은 운전조건 60°C를 발전소 전반에 걸쳐 적용하고 이 조건을 사용하여 절연체의 최고허용온도를 90°C로 설계하고 있다. 검증시험에서 가정한 운전온도 90°C는 주위온도와 케이블 자체의 온도상승을 고려한 온도이다.

대다수 구역의 공간온도 측정치는 설계온도인 40°C보다 낮으나 원자로건물 가압기 상부 구역은 정상 운전시 40°C가 유지되는 것으로 확인되었다. 보수적인 평가를 위하여 두 가지 방식을 이용하여 계산하였다. 첫 번째 방법은 케이블 표면온도 값을 활용한 방법으로 가장 열악한 환경구역(증기헤더실)에서 제시된 일반데이터 68°C를 사용하여 잔여수명을 계산하였다.

$$\text{Log}(L) = A + \frac{B}{T_{ser}} = -13.802 + \frac{6.9119 \times 10^3}{341} = 327 \text{ Years}$$

여기서, T_{ser} = 운전온도(68+273=341K)

두 번째 방법은 현재의 환경조건에 의한 공간온도 값을 활용한 방법이다. 원자로건물의 가압기 상부구역은 40°C를 유지하고 있으므로 이 값을 적용하여 계산하였다. 케이블 자체 발생열은 보수적인 값 35°C로 이용하여 계산하였다. 참고로 미국의 Ocone 1, 2&3의 LR Report에 제시된 자체 발생열은 29.65°C 까지 온도 상승이 가능하다고 제시되어 있다.

$$\text{Log}(L) = A + \frac{B}{T_{ser}} = -13.802 + \frac{6.9119 \times 10^3}{348} = 128 \text{ Years}$$

여기서, T_{ser} = 정상운전온도(40+35+273=348K)

아레니우스 공식의 회귀분석시험자료를 이용한 예상 기대수명산출 값은 128년이다. 미국의 Wyle 문서 NEQ-101에 따르면 열에 민감한 재질의 예상 기대수명요구 값이 검증수명(41년)의 3배 또는 그 이상이 된다면 열적노화는 영향을 주지 않는 것으로 판정하고 있다. 만약 예상 기대수명이 123년 미만인 경우에는 유지보수 및 교체주기로 적용된다.

그림 1에 제시한 바와 같이 초기분석에 사용된 방법과 동일한 내환경검증 프로그램을 이용하여 현재의 환경조건에 대하여 유효수명을 산출한 계산결과에 따라 차기 주기적인 전성 평가 시기까지 안전기능을 유지할 수 있다.

케이블에서 발생하는 주요 경년열화기구는 열, 방사선, 습분의 환경인자이며 이 중에서 가혹환경 지역에 설치된 케이블은 열과 방사선에 의해서 절연체와 자켓의 전기적 및 기계적 성질을 변화시킬 수 있다. 이들의 관리할 수 있는 방안으로 GALL, GTR, CCNPP, Turkey Point 등에서는 주기적인 환경조건(열, 방사선, 습분) 감시와 육안검사를 제시하고 있다. 현재 운용중인 절차서중 이들 가혹환경 지역에 설치된 케이블에 대한 경년열화 관리 프로그램이 없으므로 이에 대한 경년열화관리절차서 개발이 요구된다.

4.3 커넥터

커넥터의 주요 손상부위는 케이블과 같이 폴리머 재료가 사용되는 절연재질부분이다. 평가결과 커넥터의 절연재질은 케이블 절연재질과 동일하므로 60년 운전에 대해서는 기준 한계보다 낮게 제시되었고 터미널블록에 사용된 폴리머 재료는 고온 260°C에서 사용할 수 있도록 제작되었으므로 차기 주기적인전성평가 시기까지 안전기능을 유지할 수 있는 것으로 평가되었다. 이외에도 “전기설비 단자 접속부 정비 및 관리 지침서”에 따라 단자 접속부 및 전력용 소자류에 대해서는 적외선 온도계를 사용하여 정기적으로 측정, 점검 및

관리하고 있다. 압축커넥터의 경우 대부분 금속으로 구성되어 있고 정상운전 중 기능을 저하시키지 못하므로 이로 인한 경년열화현상은 고려할 필요가 없다.

4.4 전기관통부집합체

전기관통부집합체의 경년열화에 대한 평가방법으로는 누설을 시험에 의한 평가, 절연저항측정에 의한 평가와 온도-방사선 등의 특정상태를 평가하는 방법 등이 있다. 전기관통부집합체 고장의 상당부분은 전기절연의 절연저항감소로 인한 단락현상이므로 전기적 성능 관점에서의 절연저항과 도체의 도전성 여부에 중점을 두었다. 평가는 도출된 경년열화기구인 열노화, 조사취화, 습도, 절연저항 감소 및 누설 등에 대해 집합체를 관통하는 케이블을 중심으로 Reg. Guide 1.63과 IEEE Std-317에 따른 요건에 대한 만족여부를 확인하였다.

전기관통부집합체는 Conax사의 제품으로 IEEE Std-317(1976)에 따른 누설율, 밀봉제 사용온도, 전기적 성능, 절연내력 및 절연저항시험에 대한 요건을 만족하였다. NUREG/CR-5334, 5461에 제시된 중대사고 조건에서는 5시간 동안 견뎌내었던 것으로 제시되었다. 케이블 평가에서 제시한 바와 같이 원자로건물 내에서 관통되는 대다수의 케이블 절연재질은 60년 운전에 대한 기준한계치보다 낮게 제시되었으므로 견전성을 유지할 수 있는 것으로 평가되었고 펌프의 동작시험을 통해 케이블 견전성 여부를 주기마다 확인하고 있다. 이외에도 IEEE Std. 323-1974에 따른 내환경검증 수행으로 인해 설계수명동안 모든 환경조건(온도, 압력, 방사능, 습도 등)에서도 고유의 안전기능을 충분히 수행할 수 있도록 설계 되었다.

5. 능동형 기기의 경년열화평가

5.1 경년열화평가

전력계통의 능동형 부위에서 발생할 수 있는 경년열화현상을 분석하기 위해 해외의 미하마 기술평가서와 NPAR(nuclear plant aging research), LER, NPRDS 등을 검토하였다.^{12),13)} 기기별 고장률은 인버터, 차단기, 축전지 및 계전기 순이고 고장원인으로는 마모, 절연과괴, 단락/접지회로, 접지부식, 접촉 불량, 선로손상, 전기적과부하 및 기계적 파손 등이었다. 이러한 결과를 기본으로 평가대상 부속기기에서 발생 가능한 경년열화기구로 일반부식, 오염, 열노화, 마모, 진동, 습분, 특성변화, 철심풀림, 절연저하, 변형의 10개 항목이 평가대상으로 도출되었다.

대상 설비는 전기1급 4.16kV 스위치기어, 전기1급 로드센터변압기(4.16kV/480V), 전기1급 조절변압기(480V/120V), 전기1급 480V 전동기제어반, 전기1급 인버터, 전기1급 분전반류, 전기1급 DC 125V 축전지, 전기1급 DC 125V 축전지, 전기1급 전동기 등으로 계획에 방정비, 품질보증 프로그램 및 가동중시험 규정에 따라 정비 및 감시되고 필요시 교체가

용이하므로 경년열화평가를 대신하여 정비성능 관점의 평가를 수행하였다.

능동형 기기의 현 관리프로그램 및 정비체제가 관련 경년열화기구 관리에 적절한지 평가하기 위해서 부속기기 및 경년열화영향을 분석한 결과, 능동형 기기는 예방정비 관점에서 일반 및 정밀점검, 정기검사 등을 통해 주기적인 교체 및 관리하고 있고 원자력법 및 전기설비 정기검사, 시험절차서와 계획예방정비 등에 따라 관리되고 있으므로 현 관리프로그램 체제로서 예상되는 고장이나 이미 경험한 고장에 대해 충분히 관리가 가능한 것으로 검토되었다.

5.2 확률론적 성능 평가

본 항목은 확률론적 방법을 이용하여 위험도가 높은 능동형 기기를 선별하여 계열수준의 성능기준을 설정하고 이러한 성능기준과 성능평가 결과를 토대로 현 정비관리의 적절성을 평가하기 위한 것이다. 위험도가 높은 기기를 선별하기 위하여 확률론적안전성평가(PSA)에 따른 노심손상빈도에 영향을 미치는 정도를 평가기준으로 이용하였다. 즉, 위험도 감소값(RRW)이 1.005 이상이거나 위험도 성취값(RAW)이 2이상인 전력계통 설비와 대기상태에 있는 전력계통 설비를 대상으로 하였다. 그 결과 4.16kV 스위치기어, 480V 로드센터 등 10개 전력계통 설비(대기상태에 있는 축전지 등 2개 포함)가 도출되었다.

고 위험도 전력설비의 신뢰도 및 이용불능도 성능기준을 설정하기 위해 고리 3,4호기에 대해 각각 11.5년(1991년 1월~2002년 6월)씩 총 23년간의 고장이력을 분석하였다. 각 기기별 고장률을 산출하기 위해 기능고장 여부를 판단하였으며 본 평가에서 기능고장은 운전중지, 기동실패, 작동불능을 초래하는 식별 가능한 고장을 선정하였다. 이러한 고장이력 분석 결과로부터 성능기준 설정에 사용된 전력계통 설비에 대한 고유의 고장확률데이터는 PSA에서 사용된 값을 사용하였다.

신뢰도 성능기준은 고 위험도로 분류된 기기에 대해 허용 가능한 기능실패 횟수를 설정하는 것으로 본 평가에서는 고리 3,4호기 전력계통 설비의 고장확률과 기동횟수 및 운전시간(시험시간)을 반영하여 수행하였다. 4.16kV 스위치기어, 480V 로드센터 등의 고장은 계열별로 2년간 허용하지 않은 것으로 도출되었다.

대기상태에 있는 전력계통 설비를 대상으로 과거에 발생한 사건이 미래에 발생할 사건과 연관이 많을 것이라는 가정 하에 총 23년 동안의 정비이용불능도를 이용하여 2년 동안의 기기의 이용불능시간(out of service time ; OOS Time)을 산출하여 이용불능 성능기준으로 설정하였다.

과거 23년간의 고장이력과 정비로 인한 이용불능시간을 이용하여 설정한 성능기준을

근거로 최근 2년간의 고장 및 정비이력을 검토하여 성능기준 초과여부를 평가한 결과 표 1에서 보는 바와 같이 최근 2년간 발생한 기능고장 사례는 없어 신뢰도 성능기준을 만족하며 이용불능도 성능기준도 만족함을 확인하였다.

6. 결론

고리 3,4호기는 국내원전 운전 및 정비경험 관리에 대한 절차서가 작성된 1996년 이후부터 국내 원전의 운전 경험을 체계적으로 반영하여 왔으며, 그 내용은 각 운전 및 정비 절차서 등의 개정을 통해 반영하여 왔다. 이에 따라 운전년수 증가에 따른 취약설비 중점관리 등을 수행하고 있어서 타호기의 운전경험을 잘 반영하고 있는 것으로 확인되었다.

설계 및 제작특성 그리고 시험, 검사, 운전, 정비 등 운영기록을 기초로 수행된 전력계통의 현재 물리적 상태의 평가 결과, 안전관련 기기 및 케이블은 EQ를 수행함에 따라 안전기능을 충분히 수행할 수 있도록 설계되었음을 확인하였고 케이블간 이격거리 및 독립성 설계기준 등에 대해서도 IEEE Std. 384-1977과 Reg. Guide-1.75에 따른 설계로 모두 만족하고 있으므로 제작 및 설계로 인한 현안사항은 없는 것으로 검토되었다.

확률론적 방법을 이용한 성능기기 평가에서도 위험도에 입각한 중요기기가 모두 성능기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 평가 방법론은 전력계통 뿐만 아니라 안전성에 관련된 모든 계통의 중요기기에 적용되었으며, 향후 정비규정 이행 시에도 응용될 수 있는 방법이다. 이러한 종합적인 고리 3,4호기는 전반적으로 경년열화 관리가 양호하다. 다만 발전소 수명연장 등 장기적인 관점에서 볼 때 분전설비 경년열화 점검과 케이블 경년열화 관리는 지속적으로 필요한 것으로 도출되었다.

고리 3,4호기 전력계통의 운전경험 및 연구결과가 잘 잘 반영되고 있으며 현재 물리적 상태가 양호하고 경년열화 안전여유도도 유지되고 있어 향후에도 현행의 시험, 검사, 정비 및 설비개선 등이 지속적으로 수행되면 차기 10년간 안전성이 충분히 유지될 것임을 확인하였다.

참고문헌

1. KAERI/TR-1788, 정비규정 적용 방법 조사 및 적용연구, 한국원자력연구소, 2001.
2. US NRC, "Standard Review Plan for the Review of LR application for NPP", September 1997.
3. NUREG/CR-6490, "Nuclear Power Plant Generic Aging Lessons Learned (GALL)", 2000.
4. WCAP-14578, "Aging Management Evaluation for Electrical Distribution, Control,

- and Monitoring Equipment”, 1997.
5. WCAP-14764, “Aging Management Evaluation for Cable, Connectors and buswork”, 1998.
 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. EPRI TR-111030, “Application for Renewed Operating Licenses Oconee Nuclear Station, Units 1,2 and 3”, 1998.
 9. FPL, “Application for Renewed Operating Licenses”, Turkey Point 3 & 4, 2000.
 10. 한전 전력연구원, “분전설비 원전수명관리연구(Ⅱ) 최종보고서”, 2001.
 11. 한전 전력연구원, “케이블 원전수명관리연구(Ⅱ) 최종보고서”, 2001.
 12. 관서전력, “미하마 1호기 전기설비의 기술평가보고서”, 1995.
 13. KINS, “안전관련 전기설비의 경년열화에 관한 기술현황 분석”, 2001. 9

표 1. 계열별 성능평가결과

| 계통 | 기 기 명 | 성능기준 | | 운전이력(최근2년) | | | | 평가 결과 |
|----------------------------|---|----------|------------|------------|-----|--------|-----|----------|
| | | 허용 횟수 | 이용불능 시간 | 기능실패수 | | 이용불능시간 | | |
| | | | | K-3 | K-4 | K-3 | K-4 | |
| 전기1급 4.16KV 스위치기어계통 | A-PB-S01 B-PB-S01 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 전기1급 480V 로드센터계통 | A-PG-S01/02/03/04 B-PG-S01/02/03/04 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 전기1급 480V 전동기제어반계통 | A-PH-E01~E09 B-PH-E01~E09 C-PH-E01, D-PH-E01 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 전기1급 120V 교류계통 | A-PQ-F001/002/003 B-PQ-F001/002/003 C-PQ-F001, D-PQ-F001 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 전기1급 125V 직류계통 | A-PK-B001, B-PK-B001 C-PK-B001, D-PK-B001 | 0 | 3시간 | 0 | 0 | 0 | 0 | 만족 |
| | A-PK-F001/002/003, B-PK-F001/002/003 C-PK-F001 D-PK-F001 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 345-13.8-4.16kV 기동변압기계통 | N-MC-X01/02 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 비안전 전기1급 4.16KV 스위치기어계통 | N-NB-S01 N-NB-S02 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |
| 비안전 전기1급 125V 직류계통 | NK-B001/B002 | 0 | 3시간 | 0 | 0 | 0 | 0 | 만족 |
| | NK-F001/F002/F003/F005 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | 만족 |

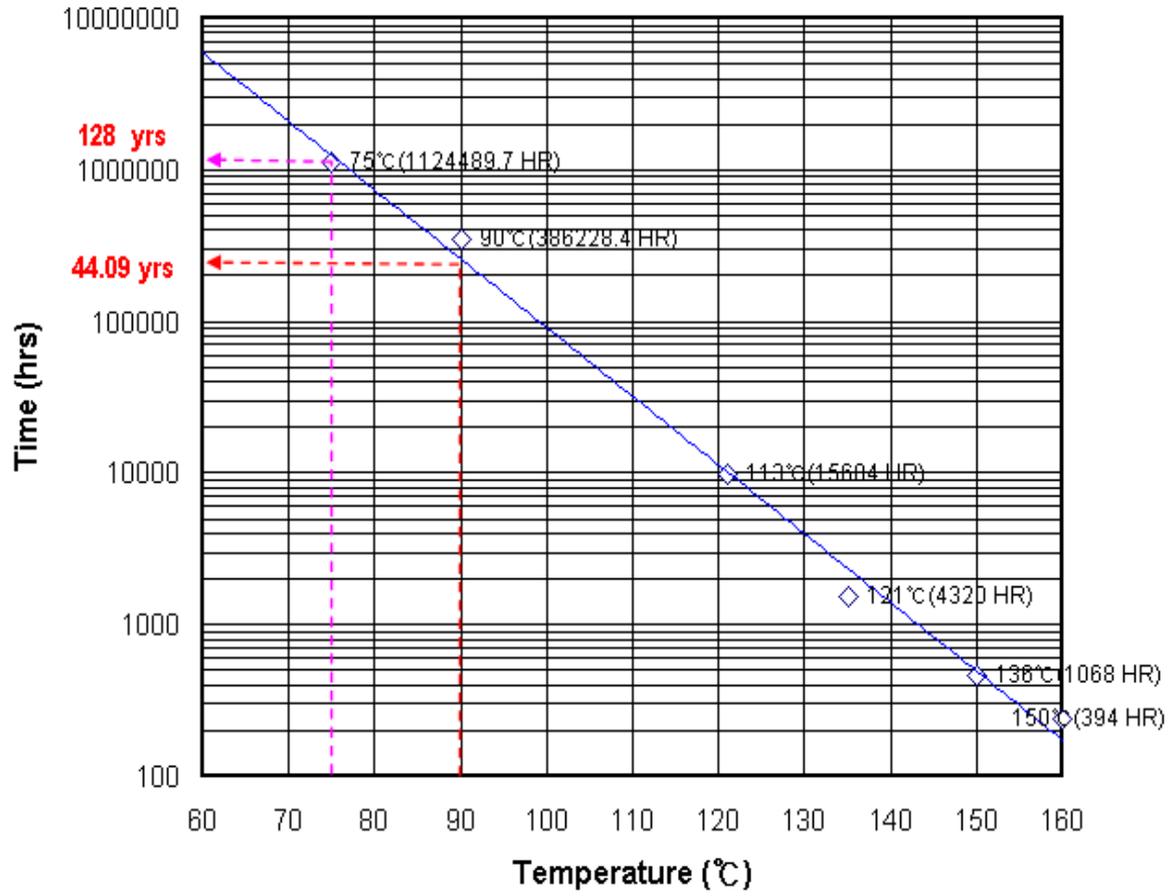


그림 1. 케이블 잔여수명 평가결과