

## 비상디젤발전기의 동적 신뢰도 모델 구축 및 이를 이용한 가속시험주기 규정 검토

최선영, 양준언, 김태운

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

원자력발전소 소외전원 상실 시 발전소를 안전하게 정지시키기 위한 비상디젤발전기의 신뢰성 평가는 계속적으로 수행되고 있는 연구과제 중 하나이다. 본 논문에서는 동적 시스템 모델링 틀을 사용하여 비상디젤발전기의 동적 신뢰도 평가를 위한 Markov 모델을 구축하였다. 구축한 동적 신뢰도 모델을 이용하여 NUREG/CR-4810에서 제안한 분석방법의 모순점을 보완하여 Reg. Guide 1.108의 비상디젤발전기 가속시험주기 규정을 이용불능도 측면에서 검토하였다. 또한 비상디젤발전기의 이용불능도는 기동실패확률 및 보수율과 기동실패 중 기동시 충격에 의한 고장 비율의 함수인 점을 고려하여 가속시험주기 규정을 따를 때 보수율과 기동시 충격에 의한 고장 비율이 이용불능도의 변화에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다.

### 1. 서론

원자력발전소에서 소외전원 상실 시 발전소를 안전하게 정지시키기 위한 주요기기에 전원을 공급하는 비상디젤발전기는 발전소 사고 경위에 큰 영향을 미치는 주요 기기에 속하며 비상디젤발전기의 이용불능도는 발전소의 안전성 평가에 있어 중요한 척도 중 하나이다.

기존의 비상디젤발전기의 이용불능도 계산방법은 고장수목 (Fault Tree) 방법과 같은 Time-Independent 모델을 사용하였다. 그러나, 비상디젤발전기는 하나의 고정된 유형의 상태만을 유지하는 정적시스템 (Static System)이 아니라 시간의 흐름에 따라 시험 및 보수 등의 상태로 변화해가는 동적시스템 (Dynamic System)이다. Time-Independent 모델은 기기의 고장확률이 시간에 따라 변하는 상태를 나타내지 못하고 평균값을 대표치로 사용하기 때문에 경우에 따라 실제보다 보수적이거나 낙관적일 수 있다.

본 논문에서는 비상디젤발전기의 이용불능도 계산을 위하여 Markov 모델을 사용하여 보다 정확하게 실세계의 모델링이 가능하도록 동적 신뢰도 모델 (Dynamic, Time-Dependent Reliability Model)을 구축하였다. 개발된 동적 신뢰도 모델은 각 시간에서 비상디젤발전기가 취할 수 있는 모든 상태를

표현할 수 있을 뿐 아니라 (overlapping) 각 시간에서 순간이용불능도 (Instantaneous Unavailability)의 계산이 가능하며 이를 이용한 시스템 운전 정책의 정량적인 평가가 가능하다.

미국 NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서는 대기시스템 (Standby System)의 이용불능도 및 신뢰도 계산을 위한 동적 신뢰도 모델로 FRANTIC 코드를 개발하였다. FRANTIC 코드는 모든 고장은 정기 시험 중 발견되며 수리보수는 항상 시험이 끝난 후 수행한다고 제한하고 있어 실세계를 제대로 반영하지 못하고 있다. 대표적인 동적모델의 하나인 Markov 모델은 각 시간별 기기의 고장이나 수리 등의 확률과정 (Stochastic Process) 모형 구축이 가능하며 로직의 변화나 다양한 시험정책의 수용이 가능하다. 그러나 기존의 Markov 모델은 일정 규모 이상의 계통을 다루기 위해서는 Transition Matrix를 자동으로 생성하고 푸는데 어려움이 있어 그 사용이 제한되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 Transition Probability Matrix를 직접 핸들링 하지 않고 Markov 모델의 구현이 가능한 동적 시스템 모델링 툴의 하나인 Vensim (Ventana Simulation Environment)을 사용하여 비상디젤발전기의 동적 이용불능도 모델을 구축하였다.

현재 국내 경수로 발전소에서 적용하고 있는 비상디젤발전기의 가속시험주기 규정은 Reg. Guide 1.108을 따르고 있으며 NUREG/CR-4810은 Reg. Guide 1.108의 가속시험주기 규정의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검토하였으나 분석방법에 있어 모순점이 발견되었다. 본 논문에서는 구축한 모델을 이용하여 NUREG/CR-4810 보고서의 모순점을 보완하고 국내에 적용되고 있는 비상디젤발전기의 가속시험주기 규정을 시뮬레이션하였다.

## 2. 비상디젤발전기 동적 이용불능도 모델 구축

### 2.1 동적 신뢰도 모델 구축을 위한 가정 사항

먼저 비상디젤발전기 동적모델 구축을 위해서 다음의 몇 가지 사항을 가정하였다.

- 비상디젤발전기의 기동 및 운전은 정기시험에 의해서만 이루어진다.
- 정기시험 시간은 2시간이다.
- 정기시험 이외에 매일 육안검사를 수행하며 이때 탐지된 고장은 즉시 수리보수를 수행한다.
- 육안검사 때 발견하지 못한 대기 중 고장은 차기 정기시험에서 기동실패를 통하여 발견된다. 따라서 기동실패 고장은 육안검사 때 발견하지 못한 대기중 고장과 기동시 자체 충격에 의한 고장으로 나눌 수 있다.
- 육안검사에 의해 탐지된 고장과 같이 기동실패고장 및 운전실패 고장에 대해서도 즉시 수리보수를 수행한다.

### 2.2 파라미터 정의

비상디젤발전기 동적 이용불능도 모델의 구축에 필요한 파라미터를 정의하였다. 비상디젤발전기의 일반자료 (Generic Data) 값은 NUREG 보고서 (NUREG/CR-2989, NUREG/CR-4810)로부터 구하였다.

- 탐지가능 대기고장률 (Detectable Standby Failure Rate,  $\lambda_D$ ) : 정기시험 사이의 대기상태에서 발생한 고장 중 육안검사를 통하여 탐지가 가능한 고장의 발생률 (7.029e-5 /hr)  
= 총 대기중 탐지가 가능한 고장수 / 총 대기시간
- 기동실패고장 중 기동 시 충격에 의한 고장의 비율 (Fraction for Failure by Demand Shock,  $\alpha$ ) : 앞에서도 설명한 바와 같이 기동실패는 기동 자체의 충격에 의한 고장과 대기상태에서 이미 발생한 고장 중 육안검사에 의해 탐지가 되지않고 기동실패로 귀결되는 고장으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 기동 시 충격에 의한 고장과 대기 중 발생한 고장으로 기동실패 고장을 분류해서 정리한 NUREG/CR-4810의 데이터를 참조하여 0.18의 값을 얻었다.
- 기동충격에 의한 기동실패확률 (Starting Failure Probability by demand Shock,  $P_{SF}$ ) : 정기시험에 의한 기동시 기동 자체의 충격의 의해 실패할 확률 (7.614e-3)  
= 기동실패확률 \*  $\alpha$   
(기동실패확률,  $\lambda$  = 총 기동실패수 / 총 기동요구수)
- 탐지불능 대기고장률 (Undetectable Standby Failure Rate,  $\lambda_U$ ) : 대기상태에서 발생한 고장 중 육안검사에 의해 탐지되지 못하고 차기 정기시험 시 기동실패로 귀결되는 고장의 발생률 (4.662e-5 /hr)  
= (기동실패확률 \* (1- $\alpha$ )) / 시험주기
- 운전실패율 (Running Failure Rate,  $\lambda_R$ ) : 성공적인 기동 후 운전 실패할 확률 (0.0024 /hr)  
= 총 운전실패수 / 총 운전시간
- 보수율 (Repair Rate,  $\mu$ ) : 비상디젤발전기가 고장이 난 후 다시 정상상태로 복구되는 비율 (0.0588 /hr)  
= 1 / 평균고장시간 (MTTR: Mean Time To Repair)
- 순간이용불능도 (Instantaneous System Unavailability,  $U_I$ ) : 각 시간 t에서 비상디젤발전기가 정지되어 있을 확률  
= 탐지가능 고장 확률 + 기동실패 고장 확률 + 운전실패 고장 확률
- 평균이용불능도 (Average System Unavailability,  $U_A$ )  
=  $(1/T) \int_0^T U_I(t) dt$ , T : 총 관찰 시간

### 2.3 동적 시스템 모델링 틀을 이용한 동적 이용불능도 모델 구축

본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 비상디젤발전기의 동적 현상을 시뮬레이션하는 방법의 하나인 Markov 모델을 시스템 모델링 틀의 일종인 Vensim을 사용하여 구축하였다. Vensim은 시간에 따라 다양하게 변하는 시스템의 거동을 모델링 할 수 있는 툴로 이를 이용하여 Transition Matrix를 만들지 않고도 Markov 모델을 시뮬레이션할 수 있다.

개발된 모델에서 정의한 상태 (State)는 다음과 같다.

- 대기성공 (Standby Success) : 비상디젤발전기가 대기상태에서 고장이 전혀 발생하지 않은 완벽한 상태 및 고장이 난 후 수리를 통하여 다시 복구된 상태

- 탐지가능 대기고장 (Detectable Standby Failure) : 대기상태에서 육안검사에 의해 탐지가 가능한 고장 상태
- 탐지불능 대기고장 (Undetectable Standby Failure) : 대기상태에서 발생한 고장 중 정기시험시 기동실패로 나타나는 고장 상태
- 기동 충격에 의한 기동 실패 (Starting Failure by Demand Shock) : 정기시험시 발생한 기동실패 중 기동시 충격에 의하여 발생하는 고장 상태
- 운전실패 (Running Failure) : 기동에 성공한 후 운전 중 고장이 발생하여 고장에 있는 상태 이상의 상태 (State)를 사용하여 구축한 상태간의 관계는 다음과 같다.

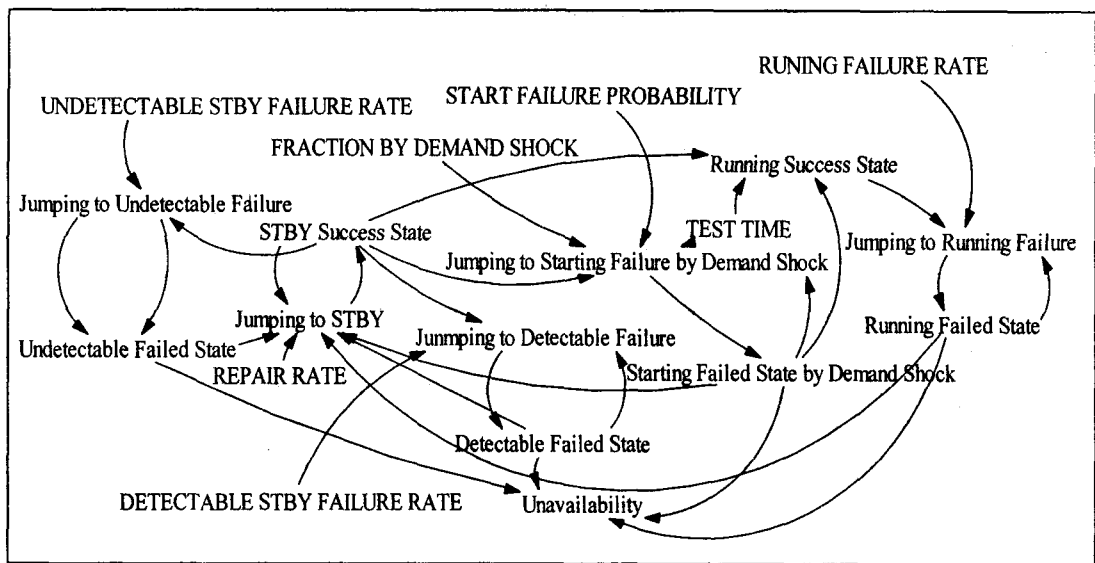


그림 1. Vensim을 사용한 비상디젤발전기 동적 신뢰도 모델 예

### 3. 동적이용불능도 모델을 이용한 가속시험주기 규정 분석

Reg. Guide 1.108에서 정의한 비상디젤발전기의 가속시험주기에 관한 규정은 다음과 같다.

100회의 유효 시험에서의 실패 회수	시험주기
≤ 1	31 일에 적어도 한 번
2	14 일에 적어도 한 번
3	7 일에 적어도 한 번
≥ 4	3 일에 적어도 한 번

NUREG/CR-4810에서는 시험주기의 감축이 오히려 이용불능도에 역효과를 미치는 것으로 분석되었다. 그러나, Reg. Guide 1.108의 규정을 검토한 기존의 보고서인 NUREG/CR-4810에서 제안한 분석에서는 기동실패확률을 상수로 처리한 후 시험주기만 변화시켜 기동실패확률의 변화에 따라 시험주기의 변화를 단축하려는 가속시험주기 규정의 본래의 취지를 반영하지 못하고 있다. 따라서 본

논문에서는 NUREG/CR-4810에서 제안한 분석방법의 모순점을 보완하여 Reg. Guide 1.108의 비상디젤발전기 가속시험주기 규정을 검토하였다. 먼저 규정의 내용에 입각하여 기동실패건수의 변화에 따라 시험주기를 단축할 때의 이용불능도를 계산하였으며 다음으로 보수율과 기동실패고장 중 기동 충격에 의한 고장 비율의 변화에 따른 이용불능도를 계산하여 가속시험주기 규정을 분석하였다.

### 3.1 기동실패건수를 증가시킨 경우

Reg. Guide 1.108의 가속시험주기 규정의 본래의 취지를 토대로 100회의 시험 중 기동실패건수를 늘려가며 그에 따른 단축된 시험주기에 대한 이용불능도를 검토하였다.

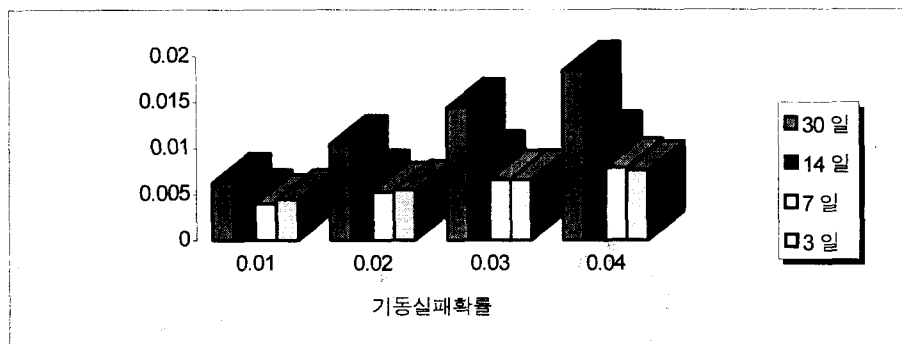


그림 2. 기동실패확률의 변화에 따른 이용불능도

위의 분석결과를 보면 기동실패확률을 제외한 나머지 파라미터는 일반자료의 값으로 고정한 후 기동실패건수만 변화를 주었을 때 Reg. Guide 1.108의 가속시험주기 규정이 타당하다는 결론을 얻을 수 있다. 즉, 100회의 시험 중 4번의 실패가 발생하였을 때 7일마다 시험을 할 때 보다는 3일마다 시험을 수행할 때의 이용불능도가 낮음을 알 수 있다.

이와 같이 문헌에 있는 일반자료를 사용하면 Reg. Guide 1.108의 규정이 타당하다는 결론을 얻었으나 실제 비상디젤발전기의 이용불능도는 단지 기동실패확률의 함수가 아니라 보수율과 기동실패중 기동시 충격에 의한 고장 비율의 함수이다. 따라서 이들의 영향을 다음 절에서 살펴보았다.

### 3.2 보수율과 기동충격에 의한 기동실패 고장 비율의 변화에 따른 가속시험주기 규정 검토

앞에서 설명한 바와 같이 본 절에서는 비상디젤발전기의 다양한 경우를 조합하여 시뮬레이션한 후 이용불능도를 바탕으로 가속시험주기 규정을 검토하였다. 그림 3과 그림 4의 분석결과를 보면 보수율이 낮을수록, 혹은 기동충격에 의한 기동실패 고장비율이 클수록 시험주기를 단축하는 것이 오히려 이용불능도 측면에서 역효과를 준다는 것을 알 수 있다. 즉, 고장의 심각도가 커서 평균수리시간이 길거나 기동시 충격이 큰 비상디젤발전기는 Reg. Guide 1.108의 가속시험주기 규정을 적용함에 있어 주의가 요구된다. 전반적으로 상태가 양호한 비상디젤발전기는 가속시험주기 규정의 적용이

타당하지만 특정 비상디젤발전기의 특성을 고려하지 않은 채 가속시험주기 규정을 적용한다면 비상디젤발전기 이용불능도의 저하를 초래할 수 있다.

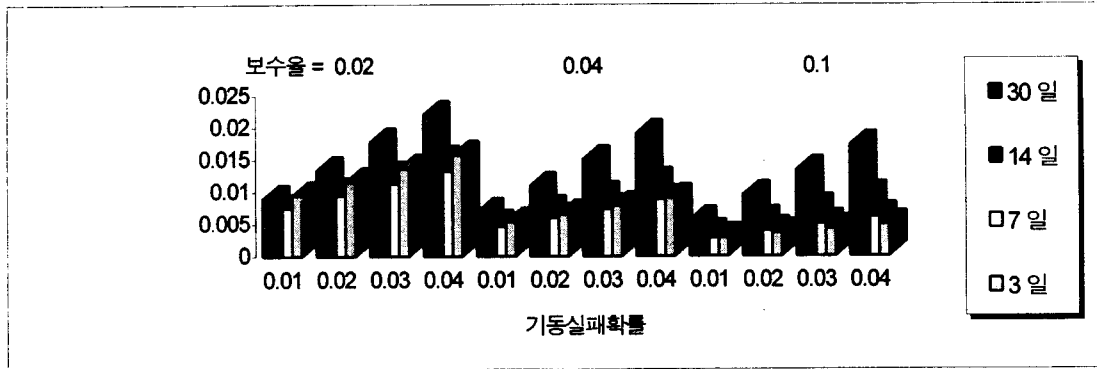


그림 3.  $\alpha = 0.18$  일 때  $\mu, \lambda$ 의 변화에 따른 이용불능도

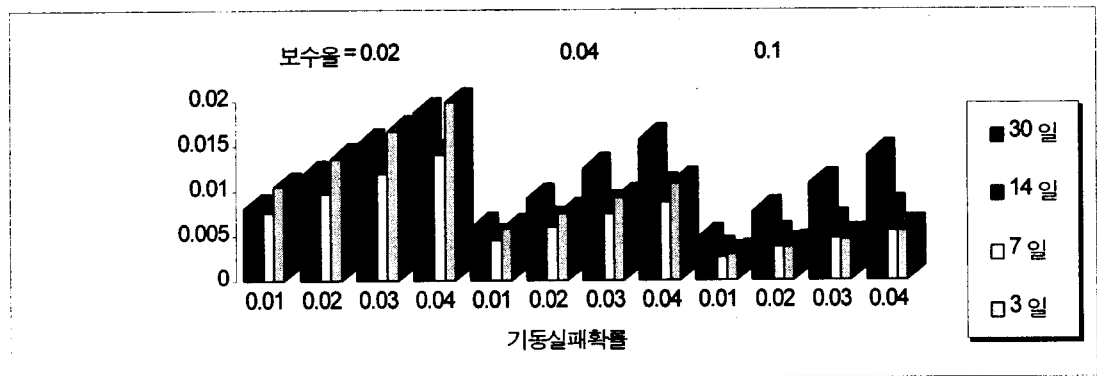


그림 4.  $\alpha = 0.36$  일 때  $\mu, \lambda$ 의 변화에 따른 이용불능도

#### 4. 결론

본 논문에서는 먼저 동적 시스템 모델링 툴을 사용하여 비상디젤발전기와 같이 시간의 흐름에 따라 다양한 상태를 취하는 시스템의 동적 신뢰도 모델을 구축하였다. 이 모델은 미국 NRC의 FRANTIC 코드보다 비상디젤발전기의 다양한 상황을 보다 현실적으로 표현하고 있다.

다음으로 구축한 동적 신뢰도 모델을 이용하여 Reg. Guide 1.108의 가속시험주기 규정을 검토하였다. 기존에 가속시험주기 규정을 검토한 NUREG/CR-4810에서 제안한 분석방법은 규정의 진정한 취지를 반영하지 못하고 있어 본 논문에서는 가속시험주기 규정의 내용을 반영한 새로운 분석방법을 제안하였다. 분석결과, 기동실패건수를 제외한 파라미터는 일반자료 데이터로 고정하고 가속시험주기 규정의 취지에 맞게 기동실패건수를 증가시키며 그에 따라 시험주기를 단축하였을 때는 가속시험주기 규정이 타당하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 보수율과 기동실패 중 기동충격에 의한 고장 비율의 변화를 주었을 때는 다른 결과를 얻었다. 보수율이 크거나 기동충격에 의한 고장비율이 큰 즉, 고장 심각도가 큰 고장이 많이 발생하거나 기기 자체의 마모나 열화가 큰 기기는 Reg. Guide 1.108의

가속시험주기 규정을 적용하면 오히려 역효과를 준다는 결론을 얻었다. 따라서 비상디젤발전기의 가속시험주기 규정을 적용하기 전에 발전소별 고유 데이터의 분석 및 신중한 검토가 요구된다.

현재 국내발전소의 비상디젤발전기 고유 데이터를 분석하여 보면 기동실패 중 기동충격에 의한 고장과 대기 중 발생한 고장의 구분이 어렵다. 추후 이와 같이 데이터의 구분이 이루어지면 본 논문에서 개발한 동적 신뢰도 모델을 이용하여 보다 정확하게 국내발전소의 비상디젤발전기에 대하여 가속시험주기 규정 적용에 대한 타당성의 구체적인 검토가 가능하다.

본 논문에서는 한 대의 비상디젤발전기에 대하여 동적이용불능도 모델을 구현하였으나 이 모델링 방법을 확장하여 여러 디젤발전기간의 관계를 고려한 호기별, 발전소별 비상디젤발전기의 이용불능도 계산과 최적 시험주기의 도출이 가능하다. 또한 본 논문에서 개발한 동적모델은 다른 다양한 동적 시스템으로의 적용이 가능하여 안전관련 계통의 다양한 이용불능도 및 신뢰도 분석을 구현할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Regulatory Guide 1.108, Periodic Testing of Diesel Generators Unit Used as Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants, U.S Nuclear Regulatory Commission, August 1977.
2. W.E.Vessely et al., Evaluation of Diesel Unavailability and Risk Effective Surveillance Test Intervals, NUREG/CR-4810, U.S Nuclear Regulatory Commission, May 1987.
3. R.E.Battle and D.J.Campbell, Reliability of Emergency AC Power Sysytems at Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2989, U.S Nuclear Regulatory Commission, June 1983.
4. T.Ginzburg and J.T.Powers, FRANTIC III – A Computer Code for Time-Dependent Reliability Analysis (User's Manual), April 1984.
5. Ronald A. Howard, Dynamic Probabilistic Systems (Vol. I, II), JOHN WILEY & SONS, INC., 1971.
6. N.Siu, Risk Assessment for Dynamic Systems: An Overview, RESS 43 (1994) 43-47
7. G.Apostolakis and T.L.Chu, The Unavailability of Systems Under Periodic Test and Maintenance, Nuclear Technology Vol.50, MID-AUG 1980.
8. Vensim User's Guide Version 1.62, Ventana Systems, Inc.
9. 김태운 외, 국내원전 소의전원 상실사고 빈도 및 고리3,4호기 비상디젤발전기 신뢰도 분석, KAERI/TR-363/93, 한국원자력연구소, 1993.5