가용도 분석을 이용한 원자로보호계통 제어기기 출력모듈의 신뢰도 설계

*김 지 영, *박 홍 래, *유 준, **이 동 영
*충남대학교 전자공학과, **한국원자력연구소
전화 : 042-823-3533 / 핸드폰 : 017-654-3387

Reliability Design of Output Module for Reactor Protection System Using Availability Analysis

Ji-Young Kim, Hong-Lae Park, Joon Lyou, Dong-Young Lee
Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University
E-mail : electron@cnu.ac.kr

Abstract

Reliability is the very important issue for nuclear fields. In this paper, an analysis method is suggested to evaluate the level of availability improvement by adding the fault diagnosis function in the control system of Reactor Protection System. The Failure Mode Effect Analysis(FMEA), MIL-HDBK-217F, and Makov modelling techniques are used for availability assessment.

I. 서론

원자력발전소에서는 신뢰도를 평가하기 위해 Bellcore 및 MIL-HDBK-217F에서 제시한 고장률 계산기법을 사용하고 있다. 이 기법은 각 부품의 고장률과 부품 수량을 이용하여 제어기기 모듈의 신뢰도를 계산한다. 이와 같이 모든 부품의 고장률 합으로서 계산하는 신뢰도 계산기법은, 제어기기의 안전성을 향상시키기 위해 설계된 보상회로 및 가용도(availability)를 높이기 위해 설치된 고장검출 회로 등이 고장원인으로 평가되어 도리어 신뢰도를 감소시키는 결과를 초래하고 있다. 그러나 고장검출 기능이 있는 시스템은 고장발생 상황을 신속히 운전원에게 알려주어 보수를 수행하므로 시스템의 가용도를 높일 수 있다.

고장검출 기능이 추가되므로 가용도가 향상되는 정도의 정량적 평가방법의 개발이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 원자로보호계통을 구성하고 있는 PLC 모듈 중에서 디지털 출력모듈(DO)에 대한 고장검출 기능을 설계하고, MIL-HDBK-217F 핸드북에서 제시한 Part Stress Analysis 기법에 따라 모듈 고장률을 분석하였다. 그리고, Markov 모델을 이용하여 고장검출 기능이 있는 DO모듈 및 고장검출 기능이 없는 DO모듈 각각에 대해 가용도를 정량적으로 평가하였으며, 이를 토대로 고장검출 기능이 추가된 DO모듈에서 가용도 개선효과에 대한 타당성을 입증하였다.

II. 원자로보호계통의 DO모듈 설계

2.1 원자로보호계통 개요

원자로보호계통은 단일고장을 방지하기 위하여 4중화 설계되어 있으며, 4중화된 채널들 중에서 두 개 이상의 채널에서 트립(trip) 설정치 이상의 신호가 입력되면 원자로를 정지시킨다[2-out-of-4 로직]. 최근 건설되고 있는 원자로보호계통은 PLC로 제작되고 있다.

4중화된 각 PLC의 DO모듈들은 2-out-of-4 조건을 만족할 때마다 개시로직(Initiation Logic) 및 RTSG (Reactor Trip Switch Gear)에 원자로정지신호를 보내는 매우 중요한 기능을 수행하는 모듈이다. 그러므로 본 연구에서는 PLC DO모듈을 대상으로 평가를 수행하였다. 그림 1은 원전 계측제어시스템의 전체 개략도이고, 그림 2는 원자로보호계통의 각 채널 구성에 대한 블럭도이다[1,2].

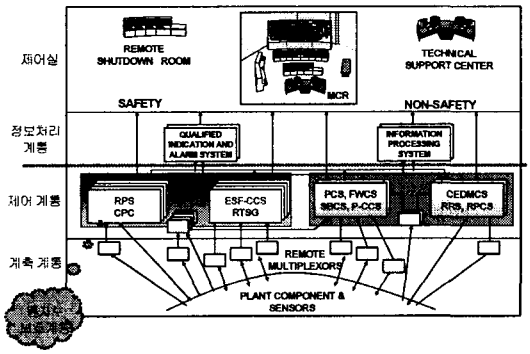


그림 1. 원전 계측제어시스템

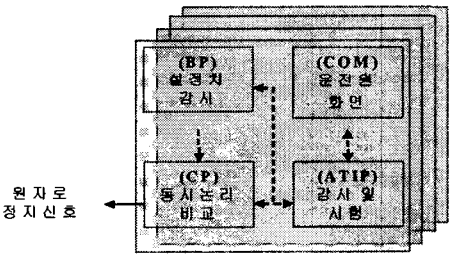


그림 2. 원자로보호계통 각 채널 구성도

2.2 디지털 출력(DO)모듈 고장검출을 위한 기능 예비설계

DO모듈에 주기시험 기능을 추가하면 고장상태를 조기에 검출할 수 있으므로 그 결과 제어기기의 고장으로 인해 원자로가 정지되는 빈도를 줄일 수 있다. DO모듈에 포함된 개별 부품의 고장은 DO모듈 전체 고장을 유발할 수 있다. 그러므로 원자로보호계통의 가용도를 개선하기 위해서는 DO모듈의 부품 노후화 또는 고장상태를 판단할 수 있는 고장검출기능의 추가가 필요하다. FMEA(Faure Mode Effect Analysis)[3] 결과 DO모듈에 대한 전체적인 건전성을 보장하기 위해서는 DO모듈에 들어오는 신호의 입력단과 외부로 나가는 출력단의 신호 전체를 포함하는 고장검출 기능의 설계가 필요하다. 그림 3은 DO모듈의 고장검출을 위한 기능 블럭도를 나타낸 것이며, 점선 부분과 같이 입력단 신호와 출력단 신호의 시간차를 보상하는 타이밍 제어장치, 저장장치 및 비교기로 구성되어 있다.

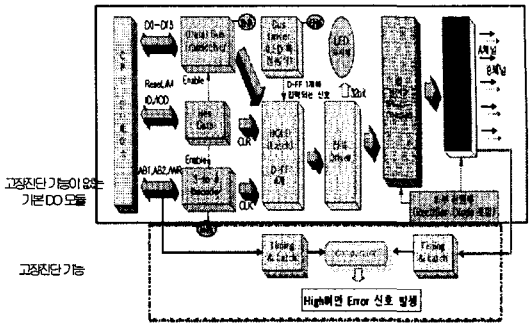


그림 3. 고장진단 기능을 포함한 DO모듈 구성도

III. MIL-HDBK-217F를 이용한 DO모듈의 고장률 평가

3.1 MIL-HDBK-217F 방법

(1) 기본 DO모듈의 고장률

MIL-HDBK-217F 핸드북의 Part Stress Analysis 기법에서 사용되고 있는 부품고장률 모델은 부품의 종류에 따라 다르나 일반적으로 나타내면 다음과 같다[4].

$$\lambda_i = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E \pi_{oth} \quad Failures/\ 10^6 Hours$$

여기서

λ_i = 부품고장률(Failure/10^6 hours)

λ_b = 기본고장률(Base Failure Rate)

π_T = 부품 운전온도계수(Quality Factor)

π_Q = 부품 품질계수(Environment Factor)

π_E = 부품 운전환경계수(Environment Factor)

π_{oth} = Other Factor(π_A , π_R , π_S , π_C , π_V , π_P)

를 나타낸다. 위의 부품고장률을 바탕으로 DO모듈의 고장률은 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$$

여기서 λ_i는 부품의 고장률을 λ_S는 모듈의 고장률이다. 이 식을 이용하여 PLC 제어기기 기본 DO모듈의 고장률을 분석한 결과 2.65E-06 Failures/Hour의 고장률을 나타내었다[5,6]. 그림 4는 그 분석결과를 그래프로 표시한 것이며, 릴레이가 DO모듈의 고장률에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다. 그러므로 DO모듈의 신뢰도를 향상하기 위해서는 릴레이 부품의 개선

이 필수적이다.

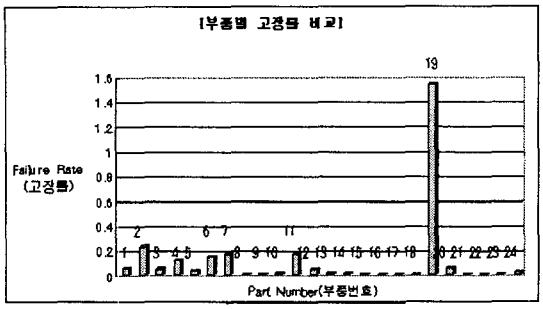


그림 4. 부품별 고장률 비교 그래프

(2) DO모듈 고장검출 기능의 고장률

추가된 DO모듈의 고장검출 기능은 입력단 신호와 출력단 신호의 시간차를 보상하는 타이밍 제어장치, 저장장치 및 비교기로 구성되어 있다. 이들 고장검출 기능을 구성하고 있는 부품에 의한 고장률을 MIL-HDBK-217F 핸드북에서 제시한 Part Stress Analysis 기법에 따라 분석한 결과 0.990954E-06 Failures/Hour의 고장률을 나타내었다[5,6].

(3) 고장검출 기능을 포함한 전체 DO모듈의 고장률

고장검출 기능을 포함한 전체 DO모듈의 고장률은 앞에서 구한 DO모듈의 고장률과 고장검출 기능의 고장률의 합으로 표현된다. 고장률 계산 결과는 표 2와 같이 신뢰도 개선을 위해 주기시험 기능을 포함한 DO모듈의 고장률이 고장검출 기능이 없는 기본 DO모듈의 고장률보다 나쁘게 평가되었다.

표 2. 고장률 비교

구분	고장률
기본 DO모듈의 고장률 ①	2.650952E-06
고장검출 기능의 고장률 ②	0.990954E-06
고장검출 기능을 포함한 DO모듈의 고장률 (①+②)	3.641906E-06

Ⅳ. 신뢰도 개선효과의 정량화 방법

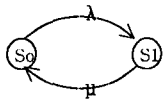
이상에서 신뢰도 개선을 위해 추가된 고장검출 기능이 모듈의 고장률을 악화시키는 것으로 평가되었다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 Markov 모델을 이용하여 원자로보호계통을 구성하는 PLC 제어기기의 DO모듈에 대한 가용도를 평가하였다[4,7]. 가용도란 어떤 시점 t 에서 시스템을 사용하려고 할 때 그 시스템이 제대로 동작하게 될 확률로 정의하며 다음 식으로 표시된다.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{- (a)}$$

여기서 MTBF는 평균고장시간(Mean Time Between Failure)을, MTTR은 평균고장수리시간(Mean Time To Repair)을 나타낸다. 가용도를 높이기 위해서는 MTTR을 감소시켜야 하며, MTTR≈0인 경우 가용도 ≈1이 된다. MTTR을 감소하기 위해서는 고장발생 시 가능한 빨리 고장발생 여부 및 발생위치를 검출하고 신속한 사후보전을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 가용도를 분석하기 위해, DO모듈의 기능을 고장검출 기능을 제외한 기본 DO모듈과 고장검출 기능이 추가된 모듈로 구분하였다. 모델링의 단순화를 위하여 기본 DO모듈과 고장검출 기능의 고장은 상호 독립적인 것으로 가정하였다. 즉 기본 DO모듈에서 발생한 고장이 고장검출 기능의 동작에 영향을 주지 않으며, 또한 고장검출 기능에서 발생한 고장이 기본 DO모듈의 동작에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다.

4.1 고장검출기능이 없는 DO모듈의 Markov모델



S_0 : DO 모듈의 정상적인 동작 상태
S_1 : DO 모듈에 고장이 발생한 상태
λ : DO 모듈의 고장률
μ : DO 모듈의 수리률

Markov모델을 미분방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0 + \mu P_1$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu P_1$$

$$P_0(0) = 1,\ P_1(0) = 0$$

여기서 P_0는 DO모듈이 정상적으로 동작하고 있는 S_0 상태에 있을 확률, P_1은 DO모듈에 고장이 발생한 S_1 상태에 있을 확률, 그리고 $P_0(0)$ 및 $P_1(0)$는 S_0 또는 S_1 상태에 있을 초기조건을 나타낸다. 이 방정식을 풀면 다음과 같다.

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} exp\{-(\lambda+\mu)t\}$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu} exp\{-(\lambda+\mu)t\}$$

가용도 $A(t)$는 정의에 의해 시점 t에서 어떤 시스템이 정상적으로 가동할 확률이므로 $A(t) = P_0(t)$ 이다. 여기서 정상상태(Steady State) 가용도 A는 다음 식으로 표시된다.

$$A = \lim_{t\to\infty} A(t) = \lim_{t\to\infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu}$$

이 식에서 분모 및 분자를 $\lambda\mu$로 나누면 다음과 같다.

$$A = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu}}$$

고장률이 지수분포인 경우 평균고장시간 MTBF는 평균고장률 λ의 역수로 표시되므로 위 식은 처음에 정의한 가용도 (a)식과 일치한다. 고장검출 기능이 없는 DO모듈에 발생한 고장은 정기검사기간에 DO모듈의 논리검사를 수행하여야만 고장발생을 검출할 수 있다. 일반적으로 DO모듈의 논리검사는 30일의 주기로 수행되고 있다. 그러므로 고장이 발생하여 수리에 소요되는 평균고장수리시간 MTTR = $1/\mu$ =(30일 / 2) * 24 시간 + 8시간 = 368 시간 이다. 여기서 고장은 논리검사 주기인 30일 내에서 균일하게 발생할 수 있으므로 논리검사 주기를 평균하여 15일로 설정하였다. 또한 고장을 검출하여 수리에 필요한 시간은 8시간을 적용하였다.

앞 절에서 언급한 Military Handbook의 Part Stress Analysis에 의한 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률은 λ = 2.650952E-06 이므로 이를 위 식에 대입하면, DO모듈의 정상상태(Steady State) 가용도 A는 다음과 같다.

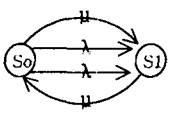
$$A = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{2.7174E-03}{2.650925E-06+2.7174E-03} = 0.999044$$

4.2 고장검출기능을 포함한 DO모듈 Markov모델

고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장유형 및 동작성은 표 3과 같다.

표 3. DO모듈의 고장유형 및 동작성

고장유형	기본DO모듈상태	고장검출기능상태	출력신호의 상태	Maintenance	Markov State
1	정상	정상	정상		S_0
2	고장	정상	이상	즉시 보수	S_1
3	정상	고장	정상		S_0
4	고장	고장	이상	정기검사 기간에 보수	S_1



S_0 : DO 모듈이 정상적인 동작 상태
S_1 : DO 모듈에 고장이 발생한 상태
λ_b : 기본 DO모듈의 고장률
λ_d : 고장검출 기능의 고장률
μ_b : 기본 DO 모듈의 수리률
μ_d : 고장검출 기능의 수리률

이 때, 기본 DO모듈의 고장률 및 고장검출 기능의 고장률은 λ_b = 2.650952E-06, λ_d = 0.990954E-06 이다. $1/\mu_b$ = 8시간, $1/\mu_d$ = 1/(30일 / 2) * 24시간 + 8시간 = 368 시간이다. 여기서 DO모듈의 정상상태(Steady State) 가용도 A는 다음과 같다.

$$A = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{\mu_b+\mu_d}{\lambda_b+\lambda_d+\mu_b+\mu_d}$$
$$= \frac{2.7174E-03+0.125}{2.650925E-06+0.990954E-06+2.7174E-03+0.125} = 0.99997148$$

이상에서 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 정상상태 가용도는 0.999972이며, 기본적인 DO모듈의 가용도는 0.999044로, 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 가용도가 개선됨을 확인할 수 있었다.

V. 결론

원자로보호계통의 제어기기에 고장검출 기능을 구현하므로 고장의 발생 빈도를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 고장검출 회로가 추가되므로 향상되는 가용도의 정도를 정량적으로 평가하기 위한 일환으로, 원자로보호계통의 DO모듈에 대한 고장검출 기능을 설계하고, Markov 모델을 이용하여 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 정상상태 가용도와 고장검출 기능이 없는 기본적인 DO모듈의 가용도를 평가하였다. 그 결과 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 가용도가 개선됨을 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 바탕으로 향후 고장검출 회로가 추가되므로 향상되는 가용도의 정도를 정량적으로 평가하기 위한 기법을 개발할 예정이다.

참고문헌

[1] 원자로보호계통 설계사양서, KNICS-RPS-SDR101, Rev. 00, 한국원자력연구소

[2] 이동영, 유준 외, "이항분포를 이용한 원자로보호계통 가동성 분석", 한국원자력학회, pp.223-233, 2002. 11.

[3] ANSI/IEEE Std 352-1987, IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems IEEE, 1987.

[4] 이동영, 박주현 외, "계측제어기기 수명평가 현안기술", KAERI/AR-562/2000, 2000.

[5] 모아소프트 신뢰성기술연구소, 신뢰성예측 가이드 (A Guide Book for Reliability Prediction), 교우사.

[6] Computer Program, Version 7.5, Relex Software.

[7] Krishna B. MISRA, "RELIABILITY ANALYSIS AND PREDICTION : A Methodology Oriented Treatment", Elsevier.