

제어봉 제어 시스템의 제어함에 대한 RBD 분석

정해원, 서중석, 육심균, 남정환
 두산중공업 기술연구원 시스템기술연구팀

THE RELIABILITY PREDICTION OF CONTROL CABINET
 OF CONTROL ROD CONTROL SYSTEM

Jung Hae Won, Sur Jung Suk, Yook Sim Kyun, Nam Jung Han
 Systems Technology Research Team, R & D Center, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - This paper describes the results of RBD(Reliability Block Diagram) analysis of control rod control system, which is being developed as part of KNICS project. The results of RBD indicate unavailability of control cabinet for control rod control system. A purpose of RBD is to evaluate unavailability of control cabinet, identify the design drawbacks of control cabinet, and propose design improvement to a designer to help design the more reliable control rod control system. This RBD defines the logical interaction of failure within a system.

1. 서 론

신뢰성 분석은 시스템, 기기, 부품 등의 수명을 예측하고, 예측된 수명을 적용하여 규정된 조건 하에서 의도하는 기간동안 요구되는 기능을 수행할 확률을 제공하는 것이다. 특히 원자력발전소에 사용되는 제어계측 시스템은 일반적인 목적에 사용되는 시스템보다 엄격한 기준을 요구하며, 이런 엄격한 기준을 만족할 만한 신뢰성을 보장할 수 있어야 한다[1].

본 논문은 기존의 웨스팅하우스사의 아날로그 형태의 제어봉 제어 시스템을 개선된 디지털 제어 시스템으로 개발하여 발전소 적용 이전단계에서 제어함에 적용된 각 모듈의 수명을 예측하고, RBD 분석을 통해 설계의 취약점을 수정하고자 하였다.

수명예측 방법은 부품계수법(Part Count Method)와 부품응력해석법(Part Stress Method)로 나누어진다. 부품계수법은 시스템 설계 초기에 필요한 방법으로 구성품에 포함된 부품에 대한 정확한 값을 추정할 수 없을 경우 최소한의 변수만으로 신뢰도를 예측하는 방법이며, 부품응력해석법은 시스템의 완성단계에서 설계에 따른 상세 사양과 변수를 입력하여 신뢰성을 예측하는 방법이다[2][3]. 본 논문의 예측수명은 부품계수법에 의한 결과이다.

RBD는 시스템 내의 고장에 대한 논리적인 동작 연결로 정의된다. 개개의 블록은 단일 구성품, 하위 시스템 등의 고장률을 나타내고, 이렇게 계산된 결과는 시스템의 수명과 불가용도(unavailability)를 예측할 수 있다[4].

본 논문은 개선된 디지털 제어 시스템에 사용된 모듈의 수명을 예측하고, 예측된 결과를 적용하여 RBD 분석을 통해 일정 시간동안 시스템이 동작하지 않을 확률을 나타내는 시스템의 불가용도를 계산하였다.

2. 본 론

2.1 예측 수명

제어함의 예측수명은 MIL-HDBK-217F에 있는 부품 계수법에 따라 계산되었고, 제어함에 사용되는 PLC와 전원장치에 대한 사항만을 고려하였다.

2.1.1 가정

제어함의 예측수명은 구하기 위한 조건은 아래와 같다.

- 지수분포를 따르는 부품의 수명
- 하나 이상의 부품 고장은 카드 고장으로 간주
- 대기온도 : 30℃
- 환경조건 : Ground Benign

2.1.2 계산식

각 부품의 일반적인 고장률은 식 (1)로 표현된다.

$$\lambda_p = \lambda_{base} \times \pi_E \times \pi_T \times \pi_Q \times \pi_L \dots\dots\dots(1)$$

여기서, λ_p 는 부품의 예측 고장률, λ_{base} 는 부품의 기본 고장률, π_E 는 부품의 환경팩터, π_T 는 부품의 온도팩터, π_Q 는 부품의 품질팩터, π_L 는 부품의 숙성도팩터이다.

PLC에 사용되는 각 카드의 고장률은 카드를 구성하고 있는 모든 부품 고장률의 합으로 계산되며, 식 (2)로 표현된다.

$$\lambda_{Total} = \lambda_{p1} + \lambda_{p2} + \dots + \lambda_{N-1} + \lambda_N \dots\dots\dots(2)$$

여기서, λ_{Total} 는 카드의 예측 고장률이고, λ_{pi} 는 i 번째 부품의 예측 고장률이다.

각 부품이 작동을 시작한 후 최초 고장이 발생하는 시간을 나타내는 MTTF(Mean Time To Failure)는 고장률의 역수로 표현되고, 식 (3)으로 표현된다.

$$MTTF_p = (1 / \lambda_p) \times 10^6 \text{ [hours]} \dots\dots\dots(3)$$

따라서 각 카드에 대한 MTTF는 카드를 구성하는 각 부품 예측 고장률의 합에 대한 역수로 나타나고, 식 (4)로 표현된다.

$$MTTF_{Total} = (1 / \lambda_{Total}) \times 10^6 \text{ [hours]} \dots\dots\dots(4)$$

따라서 고장간 시간을 나타내는 MTBF(Mean Time Between Failure)는 식 (5)로 표현된다.

$$MTBF = MTTF + MTTR \text{ [hours]} \dots\dots\dots(5)$$

여기서 MTTR은 고장 수리를 위해 소요되는 시간을 의미한다. 따라서 MTTR이 아주 작을 경우, MTBF와 MTTR은 같은 값으로 간주된다.

2.1.3 PLC 모듈의 예측수명

제어봉 제어 시스템의 구성은 제어함과 전력함으로 구성되며, 제어함은 4개의 PLC, 전원장치와 운전원 모듈로 구성되어 있다.

PLC를 구성하는 모듈은 아래와 같다.

- Power module
- CPU module
- Remote I/O module
- Hot stand-by module
- TCP/IP module
- MODBUS+ module
- DI module
- AI module
- AO module
- Relay output module

각 PLC는 위에 나열된 10 종류이 모듈로 구성되며, 그림-1에 제어함의 구성을 나타내고 있다.

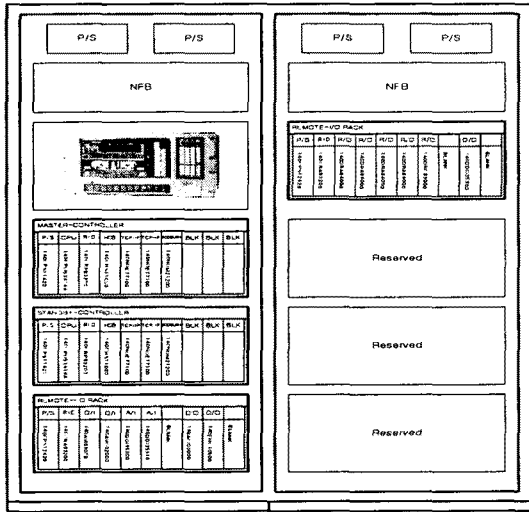


그림-1. 제어함 구성

각 모듈에 대해 2.1.1 단락에 언급한 가정과 2.1.2 단락의 식을 이용하여 고장률과 MTTF를 예측한 결과가 표-1에 나타나 있다.

표-1. 각 모듈 고장률 및 MTTF

부품	고장률	MTTF[hour]
140-CPS-114-20	3.82	262,000
140-CPS-124-20	3.82	262,000
140-CPU-534-14	4.57	218,979
140-CRA-932-00	1.62	618,191
140-CRP-932-00	1.60	624,358
140-CHS-110-00	1.34	745,685
140-NOE-771-00	2.99	334,427
140-NOM-212-00	1.81	552,132
140-DDI-353-00	3.24	308,880
140-DDI-353-10	2.74	364,776
140-AVI-030-00	2.68	372,949
140-AVO-020-00	3.25	307,379
140-DRC-830-00	3.09	323,980
140-DRA-840-00	3.39	295,117
JWS300-5	3.72	268,989

2.2 RBD 분석

제어함의 MTBF와 불가용도를 예측하기 위해 RBD 분석을 이용하였다. 제어함에는 사용되는 PLC는 4개의 랙으로 구성되어 있고, 4개의 랙은 주제어기, 부제어기와 2개의 I/O 랙으로 구성되며, 주제어기가 고장이 발생하

여 동작을 하지 못할 경우 부제어기가 동작하도록 설계되어 있으며, I/O 랙은 전원 이중화로 구성되어 있다. 이 구성은 그림 2에 나타나 있다.

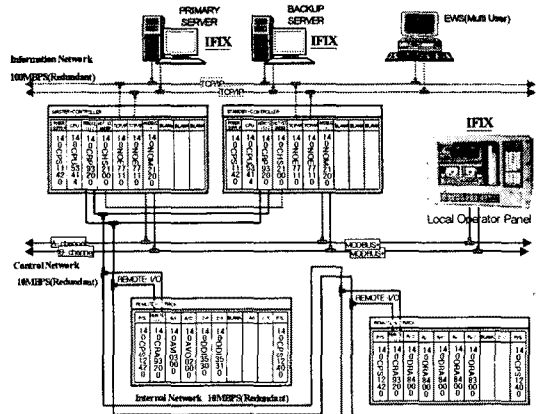


그림-2. 제어함 PLC 구성

그림-2에서 나타난 제어함과 외부 시스템의 구성 중에 PLC 부분과 전원장치만을 RBD와 전원장치 부분만을 고려하였고, 제어함에 설치된 운전원 판넬은 배제하였다. 제어함 전체에 RBD 모델링은 논리적인 형태로 연결되어지며, MTTR은 4시간으로 가정하였고, 목표 MTBF는 3년으로 설정하였다. 제어함의 RBD 모델링은 그림-3과 같이 나타낼 수 있다.

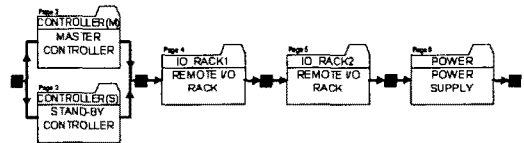


그림-3. 제어함 RBD 모델링

2.2.1 주제어기 & 부제어기

주제어기를 구성하고 있는 모듈은 아래와 같다.

- Power module
- CPU module
- Remote I/O module
- Hot stand-by module
- TCP/IP module
- MODBUS+ module

주제어기의 RBD모델링은 그림-4와 같다.

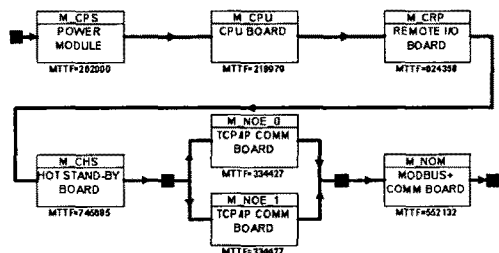


그림-4. 주제어기 RBD 모델링

부제어기는 주제어기와 동일한 구조를 가지고 있으며, 그림-4의 RBD모델링 구조와 동일하다.

2.2.2 I/O 랙

I/O 랙은 2개의 랙으로 구성되어 있고, 구성하고 있는 모듈은 아래와 같다.

- Power module
- Remote I/O module
- DI module
- AI module
- AO module
- Relay output module

I/O 랙의 RBD모델링은 그림-5와 같다.

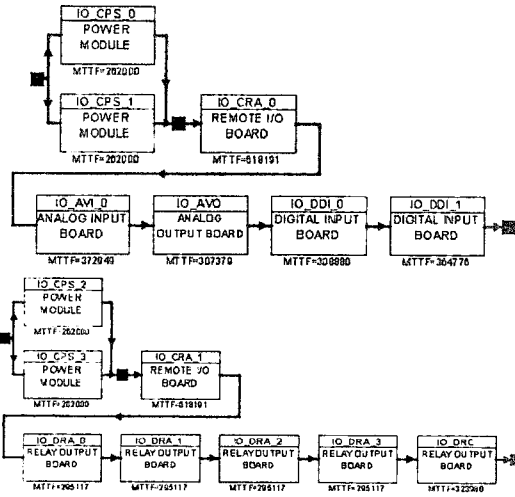


그림-5. I/O RBD 모델링

2.2.3 전원장치

제어함은 2개의 전원장치가 이중화로 구성되어 있으며, RBD모델링은 그림-6와 같다.

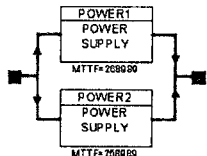


그림-6. 전원장치 RBD 모델링

2.3 결과

2.2절에 언급된 RBD 모델링을 통해 제어함의 수명과 불가용도를 분석하였다.

각 랙에 대해 분석한 결과는 표-2에 나타나 있다.

표-2. 제어함 RBD 분석 결과

Rack	불가용도	MTBF
주 제어기	0.0000525	76,113
부 제어기	0.0000525	76,113
I/O 랙(1)	0.0000541	73,907
I/O 랙(2)	0.0000730	54,774
전원장치	2.21E-10	9.2292E+9

따라서 제어함 전체에 대한 RBD 분석 결과는 불가용도가 0.000127이고 MTBF는 31,459 시간이다. 이것은 불가용도가 0.0127 %이고, MTBF가 3.59년임을 의미한다. 제어함의 불가용도와 시간의 관계를 나타내는 그래프가 그림-7에 나타나 있다.

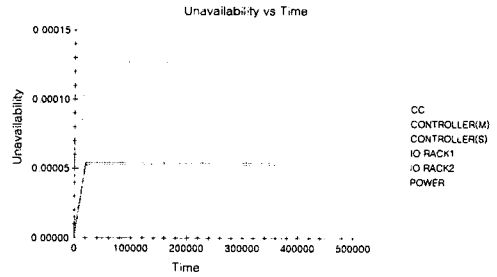


그림-7. 제어함의 불가용도

3. 결 론

본 논문은 제어봉 제어 시스템의 제어함에 대해 수명 예측과 RBD 분석을 수행하였다. 각 카드의 수명은 20년 이상을 보장할 수 있는 것으로 예측할 수 있었고, RBD 분석을 통한 불가용도 값은 제어함이 운전 중 멈추지 않고 계속 작동할 수 있을 확률이 99.9873 %라는 것을 의미하며, MTBF는 3.59년 동안 제어함이 고장없이 정상적인 동작을 할 수 있다는 것을 의미한다. 이를 통해 개발된 제어함이 원하는 기간 동안 기대하는 신뢰성을 보장할 수 있을 것으로 사료된다. 차후 FMEA 분석을 통해 좀 더 상세한 고장 분석이 이루어져야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE, "IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety System", ANSI/IEEE Std 352, 1987
- [2] Department of Defense, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", MIL HDBK 217F, 1995
- [3] 모야소프트, "A Guide Book for Reliability", 교우사, 2002
- [4] Isograph, "Reference Manual of Reliability Workbench", 2001