

## 제어봉 제어 시스템의 전력함 PCB 카드에 대한 신뢰성 예측

정해원, 서중석, 육심균, 남정환  
두산중공업 기술연구원 시스템기술연구원

### THE RELIABILITY PREDICTION OF PCB CARDS OF POWER 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 reliability prediction analysis of control rod control system, which is being developed as part of KNICS project. The results of reliability prediction indicate MTBF(Mean Time Between Failure) of cards for control rod control system. A purpose of reliability prediction is to evaluate MTBF of cards, identify the design drawbacks of cards, and propose design improvement to a designer to help design the more reliable control rod control system. This reliability prediction analysis used the part count and part stress method in the basis of MIL-HDBK-217F.

#### 1. 서 론

원자력발전소에 적용된 기존의 아날로그 계측제어시스템을 디지털화 하기 위해서는 하드웨어에 대한 신뢰성 분석 및 소프트웨어에 대한 검증이 철저히 요구된다. 신뢰성 분석의 시작인 신뢰성 예측은 수명예측을 말하며, 이는 시스템, 기기, 부품 등의 고장률을 예측하고, 예측된 고장률을 적용하여 규정된 조건 하에서 의도하는 기간동안 요구되는 기능을 수행할 확률을 제시한다.

본 논문은 기존 웨스팅하우스사의 아날로그 형태인 제어봉 제어 시스템을 개선된 디지털 제어 시스템으로 개발하여 발전소 적용 이전 단계에서 전력함에 적용된 각 카드와 카드를 구성하는 부품의 수명을 예측하고, 예측된 결과를 통해 수명에 나쁜 영향을 주는 설계에 대한 분석을 통해 교체 혹은 설계 변경을 제안함으로써 보다 개선된 신뢰성을 가지는 제어봉 제어 시스템을 구현하기 위함이다.

신뢰성 예측 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[1]. 본 논문에서는 부품응력해석법을 사용하여 신뢰성을 예측하였으며 그 결과를 소개하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 가정

전력함에 대한 신뢰성 예측을 위해 적용되는 부품응력계수법은 각 부품의 수명이 지수분포를 따르고, 카드에 사용된 부품이 하나 이상의 고장이 생기면 카드 고장으로 간주되며, 각 부품의 고장률은 다른 부품의 고장률에 대해 배타적인 통계값을 가지며, 대기온도는 25℃로 가정하였다. 이와 같은 가정을 전제로 각 카드에 대한 수명을 평가하였다.

각 부품의 일반적인 고장률은 식 (1)로 표현된다.

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

여기서  $\lambda_p$ 는 부품의 예측 고장률,  $\lambda_{base}$ 는 부품의 기본 고장률,  $\pi_E$ 는 부품의 환경팩터,  $\pi_T$ 는 부품의 온도팩터,  $\pi_Q$ 는 부품의 품질팩터,  $\pi_L$ 는 부품의 숙성도팩터 이다.

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

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

여기서  $\lambda_{Total}$ 은 카드의 예측 고장률이고,  $\lambda_{pi}$ 은 i 번째 부품의 예측 고장률이다.

각 부품의 수명을 나타내는 MTBF는 고장률의 역수로 표현되고, 식 (3)으로 표현된다.

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

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

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

##### 2.2 카드 구성

제어봉 제어 시스템은 제어함과 전력함으로 구성되며, 전력함은 제어함으로부터 제어신호를 받아서 제어봉을 구동하기 위한 전류신호를 발생시키는 장치이며 그 구성은 그림-1과 그림-2에 나타나 있다.

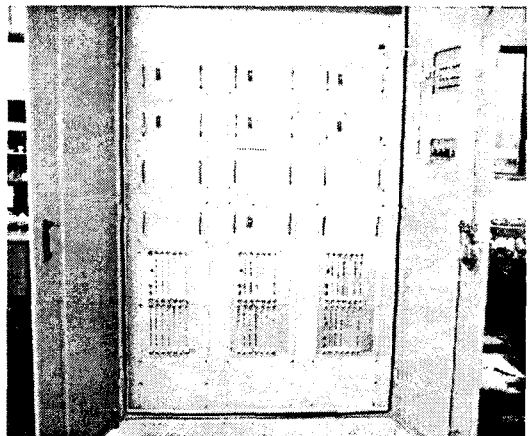


그림-1. 전력함 구성

전력함을 제어하기 위한 PCU Rack은 5 종류의 제어 카드로 구성되어 있고, 그 구성은 그림-2에 나타나 있다.

- DIC : 디지털 신호 입력 카드
- DOC : 디지털 신호 출력 카드
- DPC : DSP 프로세서 카드
- PMC : Power 감시 카드
- SCC : 신호 조절 카드

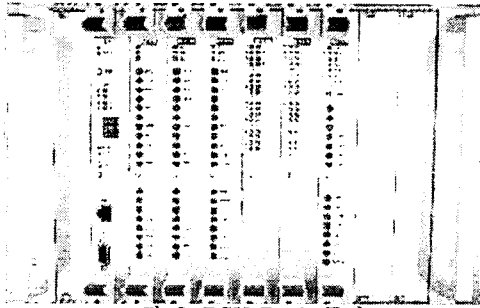


그림-2. PCU Rack 구성

5 종류의 카드를 구성하는 부품의 종류는 표-1에 나타나 있다.

표-1. 각 카드 구성 부품 및 수량

부품	DIC	DOC	DPC	PMC	SCC
Resistor	40	32	101	35	38
Capacitor	41	5	134	43	53
Inductor	-	-	2	-	3
μ-IC	9	5	53	24	22
Diode	64	32	20	6	32
Connector	1	1	11	10	1
Optoelectronic	40	40	22	33	3
Transistor	-	32	-	-	-
반진기	-	-	3	-	-
Switch	-	-	2	2	-

### 2.3 신뢰성 예측 결과

표-1에 나타난 각 카드와 카드를 구성하는 부품에 대한 상세 사양과 용력 성분을 MIL-HDBK-217F에 정의한 계산식에 따라 입력하여 카드의 고장률을 예측하였다. 고장률 예측을 위해 2.1 단락에서 언급한 가정을 적용하였다[3][4]. 환경조건은 각 카드가 이동성이 한정되어 있으며, 온도 및 습도가 가변적이고, 유지보수가 용이한 환경 조건인 Ground Benign을 적용하였다. 부품의 품질등급을 알 수 없는 경우에는 가장 낮은 등급으로 분류하였다. 이런 기준에 따라 계산된 각 카드의 고장률은 표-2에 나타나 있다.

표-2. 각 카드의 고장률

카드	Total Failure Rate	Connection Rate
DIC	4.5911603	0.0572600029
DOC	3.8599999	0.0488600023
DPC	14.7371988	0.191103995
PMC	5.22000694	0.0601992011
SCC	4.1330924	0.0409500003

Total Failure Rate는 각 카드의 예측고장률을 말하고, Connection Rate는 각 부품이 카드에 장착되는 형태에 따른 예측 고장률만을 나타낸다.

표-2에 나타난 각 카드의 예측 고장률을 이용하여 각 카드의 MTBF를 구할 수 있다. 각 카드의 MTBF는 식 (3)과 식 (4)에 의해서 표-2에 나타난 고장률의 역수는 구함으로써 예측할 수 있으며, 그 결과는 표-3에 나타나 있다.

표-3. 각 카드의 MTBF

카드	MTBF	
	[hours]	[years]
DIC	217810	24.9
DOC	259067	29.6
DPC	67856	7.8
PMC	191571	21.9
SCC	241950	27.6

표-3에서 나타난 바와 같이 대부분의 카드의 수명이 20년 이상을 나타내고 있으며, DPC 카드의 경우 다른 카드에 비해 많은 수량의 부품으로 이루어져 있기 때문에 고장률이 크게 증가하여, 수명이 단축되는 결과를 보였다.

그림-3은 DIC 카드를 구성하는 부품 가운데 고장률에 크게 영향을 미치는 부품을 순서대로 나타내고 있다. 그림에서 각 막대는 각 부품 전체 수량의 고장률을 표시한다.

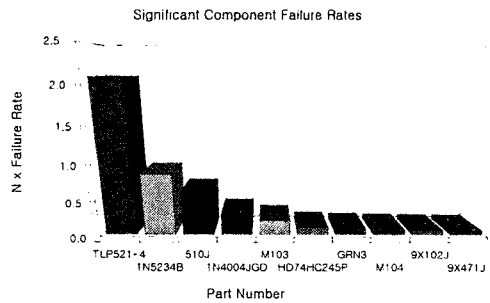


그림-3. DIC 카드의 중요 고장 성분

그림-4은 DOC 카드를 구성하는 부품 가운데 고장률에 크게 영향을 미치는 부품을 순서대로 나타내고 있다.

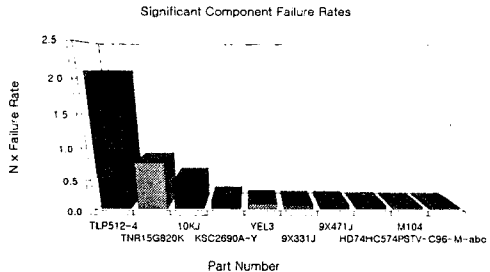


그림-4. DOC 카드의 중요 고장 성분

그림-5은 DPC 카드를 구성하는 부품 가운데 고장률에 크게 영향을 미치는 부품을 순서대로 나타내고 있다.

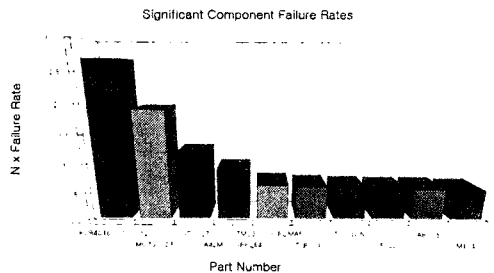


그림-5. DPC 카드의 중요 고장 성분

그림-6은 PMC 카드를 구성하는 부품 가운데 고장률에 크게 영향을 미치는 부품을 순서대로 나타내고 있다.

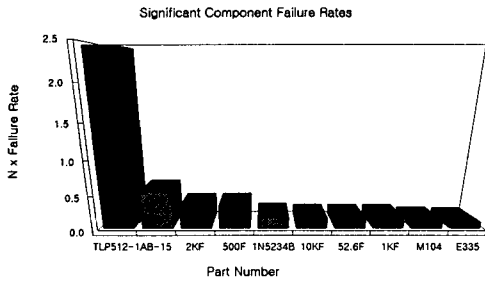


그림-6. PMC 카드의 중요 고장 성분

그림-7은 SCC 카드를 구성하는 부품 가운데 고장률에 크게 영향을 미치는 부품을 순서대로 나타내고 있다.

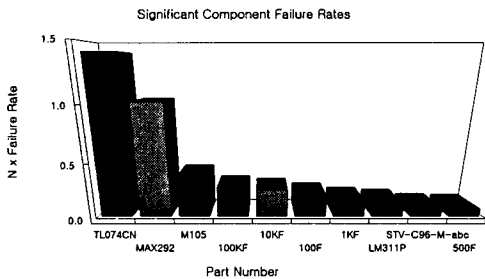


그림-7. SCC 카드의 중요 고장 성분

#### 2.4 설계 변경 제안

2.3절의 그림-3에서 그림-7에 나타난 신뢰성 예측의 결과를 보면 각 카드에서 특정 부품의 고장률이 현저히 높음을 알 수 있다. 이것은 고장률에 영향을 미치는 특정 부품의 수량이나 품질을 개선함으로써 고장률을 개선하여 카드의 수명을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 더 신뢰성 있는 부품으로 교체하여 품질을 개선하는 방법으로 설계 변경을 제안하였고, 그 결과를 분석하였다.

표-4는 각 카드에서 고장률에 크게 영향을 주는 주요 부품을 나타내고 있고, 부품에 대한 설계변경을 제안하고 있다.

표-4. 카드별 고장률 주요 성분

카드	부품	기여도(%)	제안
DIC	TLP512-4	46.24	JanTX 등급 교체
	1N5234B	6.83	JanTX 등급 교체
DOC	TLP512-4	55.01	JanTX 등급 교체
	15G820K	19.72	JanTX 등급 교체
DPC	K6R4016C	18.56	Class B 등급 교체
	MC7905	13.16	Class B 등급 교체
	CY7C027	8.16	Class B 등급 교체
PMC	TLP512-1	47.24	JanTX 등급 교체
	AB-15	10.60	Mil Spec 등급 교체
SCC	TL074	34.52	Class B 등급 교체
	MAX292	24.85	Class B 등급 교체

표-4에 나타난 각 카드의 고장률 상승에 심각한 영향을 미치는 주요 부품의 품질등급을 기존 설계에 적용된 등급에서 상향 조정하여 고장률 예측하고자 하였다. 기여도는 각 부품이 카드의 고장률에 미치는 영향을 퍼센트로 나타낸 것이다. 선정된 부품을 제안한 등급의 부품으로 교체하였을 때의 각 카드에 대한 고장률 예측 결과

는 표-5에 나타나 있다.

표-5. 부품 교체 후 카드의 고장률

카드	Total Failure Rate	Connection Rate
DIC	4.5911603	0.0572600029
DOC	3.8599999	0.0488600023
DPC	14.7371988	0.191103995
PMC	5.2200694	0.0601992011
SCC	4.1330924	0.0409500003

개선 전 카드와 개선 후 카드의 MTBF는 비교한 결과를 표-6에 나타내고 있다.

표-6. 부품 교체 후 결과

카드	교체 전 MTBF	교체 후 MTBF	개선비율
DIC	217810	371009	1.70
DOC	259067	586017	2.26
DPC	67856	105070	1.55
PMC	191571	338733	1.77
SCC	241950	513740	2.12

표-5와 표-6을 통하여 각 카드에서 고장률에 영향을 주는 주요 부품을 교체함으로써 카드의 수명이 크게 개선됨을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 제어봉 제어 시스템의 전력함에 적용된 카드에 대해서 MIL-HDBK-217F에 제시된 부품용역해석법을 적용하여 각 카드의 신뢰성을 예측하고, 그 결과를 분석하여 설계 개선을 제안하였고, 제안된 개선안을 적용한 결과를 예측하였다. 신뢰성 예측을 통해 각 카드의 부품 중에 가장 영향을 미치는 주요 성분을 파악할 수 있었고, 개선안을 통해 표-6에서 나타난 것처럼 155%에서 226%까지 개선된 효과를 예측할 수 있었다. 특히 부품의 수량이 많은 DPC 카드는 개선의 여지가 많을 것으로 사료된다. 따라서 신뢰성 예측을 통해 카드의 수명 뿐 아니라 고장률에 영향을 주는 각 부품의 기여도를 판단할 수 있었고, 이를 통해 특정 부품에 대해 고신뢰성을 보장할 수 있는 부품으로 교체함으로써 카드의 예측수명을 크게 개선할 수 있었다. 이것은 부적절한 설계로 인한 고장 발생을 줄일 수 있으며, 예측수명을 통해 원하는 기간동안에 필요로 하는 카드의 수량을 예측할 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

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