

제어모듈의 신뢰성평가

박정원¹, 함중걸¹, 정창기², 신윤오²

1. 산업기술시험평가연구소, 2. 한국전력공사 전력연구원

Reliability Assessment of Control Modules

Jungwon Park¹, Jungkeol Ham¹, Changgi Jung², YoonOh Shin²

1. Korea Testing Laboratory, 2. Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Control systems used in power plants consist of some control modules which are operated independently. A failure of control system mainly depends on a failure of control modules. So, it is important to estimate lifetimes of control modules in order to assess the reliability of control systems. In this paper, three methods for estimating lifetimes of control modules are presented and control modules' lifetimes of boiler control system used in a thermal power plant are estimated applying the three methods. Also, advantage and disadvantage of three methods are presented.

1. 서 론

발전소에서 사용되고 있는 제어시스템은 독립적인 기능을 하는 모듈들로 구성되어 있다. 각 모듈이 독립적인 기능을 하도록 설계를 하기 때문에 한 모듈의 고장이 다른 모듈에 영향을 주지 않으며, 제어시스템은 모듈들의 조합이기 때문에 제어시스템의 고장은 모듈의 고장에 가인한다. 그러므로 장기간 사용한 제어시스템을 계속 사용할 것인지 아니면 새 장비로 교체할 것인지에 대한 결정을 내리기 위하여 제어시스템의 신뢰성을 평가하는 때나 예비모듈의 수를 결정할 때 모듈의 수명에 대한 정보가 필요하게 된다(1). 모듈의 수명을 추정하는 방법으로 다음과 같은 3가지를 들 수 있다. 첫 번째 방법은 현장의 이력데이터를 이용하여 추정하는 것이고, 두 번째 방법은 MIL-HDBK-217(2)과 같은 수명예측방법을 사용하는 것이고, 세 번째 방법은 가속수명시험을 실시하여 얻은 데이터를 이용하는 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 세 가지 모듈의 수명추정방법을 제시하고, 이 세 가지 방법을 국내의 한 발전소 제어시스템의 모듈수명을 평가하는데 적용하고, 적용하는 과정에서 노출된 문제점을 통하여 3가지 방법의 장단점을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 모듈수명 추정방법

모듈의 수명은 일반적으로 산포를 가지므로 이를 표현할 통계적 분포가 필요하다. 본 연구에서는 과거의 경험과 고장 데이터에 근거하여 모듈의 수명이 식 (1)과 같은 확률밀도함수를 갖는 지수분포를 따른다고 가정한다.

$$f(t) = (1/\theta) e^{-t/\theta} \quad (1)$$

단, θ 는 평균수명(MTBF, Mean Time Between Failures)이다. 여기서 평균수명은 다음과 같은 3가지 방법을 사용하여 추정할 수 있다.


2.1.1 이력데이터를 이용한 추정방법

현장의 이력데이터는 조사결과 일반적으로 <표 1>과

같은 형태로 정리될 수 있었다

<표 1> 이력데이터의 형태

	기준시점 (S년)	S+1년	...	S+T-1년	평가시점 (S+T년)
모듈 1					
모듈 2					
⋮					
모듈 N					

※  는 고장수가 들어감.

모듈의 수명이 식(1)과 같은 확률밀도함수를 갖는 지수분포를 따른다는 가정하에서 평가기간(평가시점-기준시점) T동안 i 모듈의 고장회수 X_i 는 (2)식과 같은 확률질량함수(Probability Mass Function)를 갖는 포아송분포를 따른다.

$$P(X_i = x_i) = m^{x_i} e^{-m} / x_i! \quad (2)$$

단, $m = T/6$. 그러므로 동일한 유형의 모듈이 n개 있는 경우 T동안 n개 모듈의 고장회수 합 Y는 식 (3)과 같은 확률질량함수를 갖는 포아송분포를 따른다.

$$P(Y = y) = (nm)^y e^{-(nm)} / y! \quad (3)$$

식 (3)과 같은 포아송분포로부터 평균수명 θ 의 최우추정값(Maximum Likelihood Estimator)은 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\hat{\theta} = nT/y \quad (4)$$

이력데이터를 이용하는 방법에서는 식 (4)를 이용하여 각 모듈의 평균수명을 계산한다.

2.1.2 이론적인 수명예측방법

MIL-HDBK-217에서는 미국방성에서 축적한 부품의 고장률 데이터를 이용하여 시스템에 대한 고장률을 예측하는 방법을 제시하고 있다. MIL-HDBK-217에서 제시하고 있는 방법은 부품수분석(Parts Count Method)과 부품부하분석(Parts Stress Analysis)의 두 가지인데 부품부하분석은 부품에 대한 상세한 정보를 필요로 하기 때문에 대상 시스템을 제조한 제조업체가 아닌 곳에서 이 방법을 적용하는데 어려움이 있다. 그러므로 현장에서 사용자 입장에서 수명을 예측하는 경우 주로 부품수분석에 의존하게 된다. 부품수분석에서는 먼저 각 부품에 대하여 식 (5)와 같이 고장률을 계산한다.

$$\lambda_k = \lambda_{kb} \pi_{kQ} \quad (5)$$

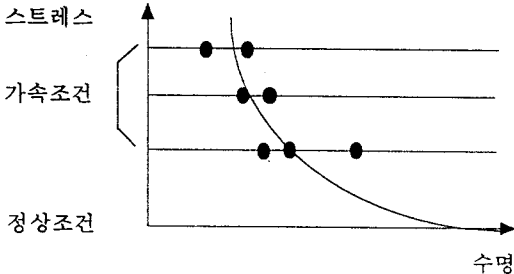
단, λ_k 는 부품 k의 고장률, λ_{kb} 는 부품 k의 기본 고장률, π_{kQ} 는 부품 k의 품질패터이다. 이러한 부품의 고장률로부터 식 (6)과 같이 모듈의 고장률을 계산한다.

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{N_i} n_{ik} \cdot \lambda_k \quad (6)$$

단, λ_i 는 모듈 i 의 고장률, n_{ik} 는 모듈 i 에 포함된 부품 k 의 수량, N_i 는 모듈 i 에 포함된 부품의 종류 수, λ_{ik} 는 모듈 i 에 포함된 부품 k 의 고장률이다. 이와 같이 예측된 고장률의 역수가 모듈의 평균수명에 대한 예측값이 된다.

2.1.3 가속수명시험 데이터를 이용한 추정방법

가속수명시험은 시험시간을 단축하기 위하여 <그림 1>과 같이 시료의 정상사용조건보다 높은 스트레스 조건에서 시험한 후 수명과 스트레스 사이의 관계식을 통하여 정상사용 조건의 수명을 추정하는 방법이다.



<그림 1> 가속수명시험의 개념

일반적으로 부품의 가속수명시험에서는 많은 시료수를 확보할 수 있기 때문에 <그림 1>에서와 같이 여러 가속 스트레스 수준에서 시험하여 고장데이터를 얻은 후 고장데이터를 분석하여 정상조건에서의 수명을 추정하지만, 모듈의 가속수명시험에서는 모듈이 비싸기 때문에 여러 조건에서 시험할 수가 없으며 한 조건에서만 시험한다고 하여도 많은 시료를 시험할 수 없는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 이와 같은 시료수의 제약하에서 모듈의 수명을 추정하기 위하여 다음과 같은 절차에 따라서 분석하였다.

- ① 주요한 기능을 갖는 모듈들을 선택하여 현장에서 사용하던 모듈을 그 이력과 함께 수집한다.
- ② 수집된 모듈들을 항온기에 넣고 모듈의 최대 사용온도에서 동작을 시키며 일정시간 시험한다. 모듈의 고장 여부는 중도에 기능 점검시간을 정하여 그 점검시간에 항온기에서 시료를 꺼내어 모듈의 기능을 점검함으로써 확인한다.
- ③ 고장이 발생한 경우 어느 부품에서 고장이 발생하였는지 기록하고, 고장이 발생한 시간도 기록한다.
- ④ 시험이 종료되면 시험결과 얻어진 고장데이터를 토대로 다음과 같이 데이터분석을 한다.
 - a. 시험한 모듈의 구성부품을 MIL-HDBK-217의 분류기준에 따라서 분류한다.
 - b. 시험한 모듈의 구성부품에 대하여 각 분류에 속하는 부품의 수를 조사한다.
 - c. 분류된 각 부품의 종류마다 MIL-HDBK-217의 온도팩터를 이용하여 가속계수를 구하고, 구한 가속계수를 이용하여 시험결과 얻어진 고장데이터를 정상사용조건에서의 고장시간으로 환산한다.
 - d. 환산한 고장시간과 현장에서의 사용시간을 더하여 총 사용시간을 구하고, 그 시간동안의 고장수를 이용하여 식(7) 또는 식(8)과 같이 부품의 고장률을 계산한다[3].
 - 고장이 발생한 경우

$$\lambda = r/nT \quad (7)$$

단, λ 는 부품 고장률의 추정값, n 은 부품수, T 는 총 사용시간(시험시간+사용시간), r 은 고장수이다.

- 고장이 발생하지 않은 경우

$$\lambda \text{의 } (1-\alpha) \times 100\% \text{ 신뢰상한} \\ = \chi^2(2, \alpha) / 2nT \quad (8)$$

단, λ 는 고장률, n 은 부품수, T 는 총 사용시간이다.

- ⑤ 식(7) 또는 식(8)을 이용하여 추정된 부품의 고장률을 이

용하여 식(9)와 같이 모듈의 고장률을 계산한다.

$$\hat{\lambda}_i = \sum_{k=1}^{N_i} n_{ik} \cdot \hat{\lambda}_{ik} \quad (9)$$

단, $\hat{\lambda}_i$ 는 모듈 i 의 고장률, n_{ik} 는 모듈 i 에 포함된 부품 k 의 수량, N_i 는 모듈 i 에 포함된 부품의 종류 수, $\hat{\lambda}_{ik}$ 는 (7) 식 또는 (8)식에 의하여 추정된 모듈 i 에 포함된 부품 k 의 고장률이다.

2.2 적용사례

국내의 한 발전소에서 사용되고 있는 보일러 제어시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 앞에서 언급한 3가지 방법을 적용하여 보일러 제어시스템을 구성하는 모듈들의 평균수명을 추정하였다.

2.2.1 이력데이터를 이용한 추정

이 보일러 제어시스템은 12종류의 모듈로 구성되어 있었으며 이력데이터를 수집한 결과 <표 2>와 같은 이력데이터가 얻어졌다. <표 2>의 이력데이터를 이용하여 모듈의 평균수명을 추정한 결과 <표 3>과 같았다.

<표 2> 보일러 제어시스템의 이력데이터

모듈 No.	수량	91	92	93	94	95	96	97
1	12		1	1	4	1	3	3
2	12						2	
3	4				1			
4	4					2		
5	4					2		
6	8					2		
7	54		4		2	4	5	2
8	26			1	1	3		
9	8					2		
10	12					2		1
11	40				2	2	4	4
12	4			1				

<표 3> 모듈의 평균수명

모듈 No.	1	2	3	4	5	6
MTBF(년)	6	42	28	14	14	28
모듈 No.	7	8	9	10	11	12
MTBF(년)	22	36	28	28	23	28

2.2.2 이력데이터를 이용한 추정

MIL-HDBK-217을 이용하여 모듈의 수명을 예측하기 위해서는 모듈을 구성하는 부품의 품질팩터가 필요하다. 모듈의 고장률 예측값은 이 품질팩터에 따라서 크게 달라지는데, 현장에서 이와 같은 품질팩터에 대한 정보를 얻기 어려우므로 정확한 수명예측에 어려움이 있었다.

본 연구에서 대상으로 한 제어시스템의 경우에는 제조업체에서 제공한 모듈의 예측수명 자료가 있어 <표 4>에 나타내었다.

<표 4> 모듈의 예측수명

모듈 No.	1	2	3	4	5	6
MTBF(년)	3	11	-	47	12	28
모듈 No.	7	8	9	10	11	12
MTBF(년)	36	30	48	67	30	73

2.2.3 가속수명시험 데이터를 이용한 추정

본 연구에서는 현장에서 사용해 온 11개의 모듈을 모듈의 최대 사용온도인 70℃에서 1000시간 시험하였으나 고장이 한 개도 발생하지 않았다. 시험결과를 부품차원에서 정리한 결과 <표 5>와 같았다. <표 5>에서 계산

된 부품별 고장률의 90% 신뢰상한을 이용하여 모듈의 고장률을 계산한 결과 <표 6>과 같았다. <표 6>에는 계산된 평균수명도 나타내었다.

<표 6> 모듈별 고장률과 평균수명

모듈 No.	고장률(10 ⁻⁶)	평균수명	
		(hr)	(year)
4	95.508	10470	1.195
5	99.099	10091	1.152
6	154.852	6458	0.737
7	105.423	9486	1.083
8	89.198	11211	1.280
9	112.471	8891	1.015
10	74.555	13413	1.531
11	68.670	14562	1.662
12	17.033	58709	6.702

모듈 1~3에 대해서는 모듈의 부품 목록을 알 수 없어서 모듈의 평균수명을 계산할 수 없었다.

2.2.4 평가 종합

국내의 한 발전소 제어시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 2.1절에서 언급한 3가지 방법을 적용하여 제어시스템을 구성하는 제어모듈의 평균수명을 추정하였다. 추정결과 가속수명시험 데이터를 이용하는 경우 고장이 발생하지 않아서 각 부품에 대한 평균수명의 90% 신뢰상한을 이용할 수 밖에 없었고, 시료수와 시험시간의 부족으로 정밀한 추정을 할 수 없었다. 이론적인 수명예측에서는 제어시스템의 제조업체에서 제공하는 제어모듈의 평균수명을 참조하였는데 이력데이터를 이용하여 추정한 평균수명과 비교해 볼 때 일부 모듈에서는 크게 차이가 나고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 차이는 제조업체에서 예측할 때에 기준한 운용환경과 실제 제어모듈의 운용환경의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 대상으로 한 제어시스템의 경우에 있어서는 신뢰할 수 있는 이력데이터의 수집이 가능하였기 때문에 이력데이터를 이용하여 추정한 값으로 제어모듈의 평균수명을 삼았다.

2.3 3가지 수명추정방법의 비교

<표 5> 부품별 고장률의 90% 신뢰상한과 MTBF의 90% 신뢰하한

부품	세부분류	수량(개)	사용시간(hr)	시험시간(hr)	총사용시간(hr)	MTBF(hr)($\alpha=0.1$)	λ ($\alpha=0.1$)
CAPACITOR	Ceramic	102	8891400	117708	9009108	3912750	0.256
CAPACITOR	Plastic	122	12350700	354166	12704866	5517857	0.181
CAPACITOR	Tantal	42	4848300	69006	4917306	2135638	0.468
DISCRETE	Diode, LED	7	873540	250831	1124371	488326	2.048
DISCRETE	Diode, Si	133	15092160	518700	15610860	6779961	0.147
DISCRETE	Diode, Zener	51	5032080	131580	5163660	2242632	0.446
DISCRETE	Single Isolator	12	1051200	430560	1481760	643544	1.554
DISCRETE	TR, FET	3	398400	8334	406734	176649	5.661
DISCRETE	TR, NPN	64	7756980	161664	7918644	3439150	0.291
DISCRETE	TR, PNP	34	4027860	100912	4128772	1793169	0.558
DISCRETE	TR, Unijunction	2	291180	6388	297568	129237	7.738
RELAY		4	494940	7332	502272	218142	4.584
IC	Linear, ~14P	69	7713480	4652500	12365980	5370675	0.186
IC	Linear, 15P~	1	91980	100000	191980	83379	11.993
IC	Logic, ~16P	90	10361640	2250500	12612140	5477585	0.183
IC	Logic, 17P~24P	10	867240	336000	1203240	522580	1.914
IC	Logic, 25P~40P	8	683280	727500	1410780	612717	1.632
IC	RAM, 4K	2	183960	200000	383960	166758	5.997
IC	RAM, 16K	1	83220	100000	183220	79574	12.567
IC	ROM, 32K	3	258420	227500	485920	211040	4.738
IC	ROM, 256K	1	83220	27500	110720	48087	20.796

본 연구에서 모듈의 수명을 추정하기 위하여 2.1절에서 언급한 3가지 방법을 적용해 본 결과 3가지 방법에 대하여 <표 7>과 같은 장단점을 알 수 있었다.

<표 7> 세 가지 모듈 수명추정방법의 비교

추정방법	특징
이력데이터 분석	<ul style="list-style-type: none"> 정확한 데이터의 수집이 어려움. 이력데이터가 관리가 잘 되어 있는 경우 세 가지 방법 중 분석을 위한 노력이 가장 적게 들.
이론적인 수명예측	<ul style="list-style-type: none"> 데이터를 얻기가 수월 (MIL-HDBK-217에서 자료 제공). MIL-HDBK-217에서 제공하는 자료를 이용하므로 데이터의 현실감이 떨어짐. MIL-HDBK-217에서 제공하는 모듈의 팩터값 결정이 어려움.
가속수명시험	<ul style="list-style-type: none"> 시험을 통하여 고장데이터를 얻으므로 현실감 있는 데이터를 얻을 수 있음. 시험에 많은 비용과 노력이 들.

3. 결 론

본 연구에서는 제어모듈의 수명을 추정하기 위한 3가지 방법을 제시하고, 이 3가지 방법을 국내 한 발전소 제어시스템에 적용하여 구성 제어모듈의 수명을 추정하였다. 적용한 결과에서 볼 수 있듯이 가속수명시험에 의존하는 경우 많은 비용과 노력이 들므로, 제어모듈의 수명을 추정하기 위해서는 이력데이터의 관리가 중요하며, 제어시스템 구입시 제조업체로부터 제어모듈의 수명에 대한 정보를 확보하여야 한다.

[참고 문헌]

- [1] 산업기술시험평가연구소, 장기사용 발전소 제어설비 신뢰성을 위한 개조방안 연구-중간보고서, 1998.
- [2] MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1995.
- [3] P.A. Tobias and D.C. Trindade, Applied Reliability, Van Nostrand Reinhold Company, 1986.