

장기사용 발전소 제어시스템의 예비모듈 수 결정 사례

정창기 · 신운오

전력연구원 발전연구실 발전계전그룹

박정원 · 함중걸

산업기술시험원 기술감리본부 신뢰성평가팀

A Case Study on Determining the Number of Spare Modules in Power Plant Control System Used for Long Term

Chang-Gi Chung · Yoon-Oh Shin

Korea Electric Power Research Institute, Power Generation Laboratory,
Electric Instrument & Control Group

Jung-Won Park · Jung-Keol Ham

Korea Testing Laboratory, Technical Supervision Division, Reliability Assessment Team

Abstract

When an electronic control system has been used for long time, the electronic control system becomes obsolete and no longer in production. In this case, the existing control system should replace by new system due to shortage of spare modules. However, if the proper number of spare modules are stocked, it may be possible and more economical than to replace by new system to extend the usage period of the existing control system. In this case, it is an important problem to determine the proper number of spare modules. In this paper, a method to determine the proper number of spare modules is presented with an application example.

1. 서론

일반적으로 어떤 기기를 장기간 사용하게 되면 기기가 열화되어 여러 가지 문제가 발생하고 기기의 사용자는 교체를 고려하게 된다. 발전소에서 사용하고 있는 제어시스템도 다른 기기와 마찬가지로 장기간 사용하게 되면 교체를 고려하게 되는데 제어시스템의 경우 교체하는 이유가 제어시스템이 열화되어 사용할 수 없게 되기 때문보다는 같은 모델의 제어시스템 생산이 중단되어 예비품을 구할 수 없기 때문인 경우가 많다. 제어시스템은 독립된 기능을 갖는 제어모듈들로서 구성되어 있고, 이러한 제어시스템에 있어서 고장은 제어모듈의 고장에 의하여 주로 발생한다. 제어시스템은 일반적으로 제어모듈이 고장나는 경우 고장난 제어모듈에 의하여 다른 제어모듈이 영향을 받지 않도록 설계되어 있기 때문에 고장난 제어모듈만 정상적인 제어모듈로 교체하면 다시 정상적으로 사용될 수 있다. 그러므로 제어시스템을 계속 사용할 수 있는지 여부는 예비모듈의 확보 가능성 여부에 달려있다.

최근 설계수명에 이른 발전소 설비들의 수명을 연장하는 것이 가능하고, 교체하는 것보다 더 경제적이라고 하는 것이 보고되면서 발전소 설비들을 교체하기보다 수명을 연장하려고 노력하고 있다[Criscimagna, N. and Unkle, R., 1995]. 제어시스템의 경우도 예외가 아닌데 제어시스템의 수명을 연장하려고 할 때 제조업체의 제어시스템 생산 중단은 제어시스템의 수명연장에 큰 제약이 된다. 그러므로 제어시스템의 수명을 연장하기 위해서는 제어시스템이 생산 중단되는 시점에서 충분한 모듈을 확보하여야 한다.

이와 같은 배경에서 발전소에서는 제어시스템의 생산이 중단되는 시점에서 추가적인 예비모듈을 구입해 왔는데, 예비모듈을 구입할 때 모듈의 수명을 고려하지 않고 동일한 수량의 예비모듈을 구입하였기 때문에 구입 후 사용하면서 일부 모듈은 많은 예비모듈이 남고, 일부 모듈은 모자라게 되는 상황을 겪어왔다. 또한, 제어시스템을 계속 사용하는데 있어서 구입한 수량의 모듈로 앞으로 더 사용하고자 하는 기간동안 제어시스템을 얼마나 안정적으로 사용할 수 있는지 평가할 수 있는 평가척도가 없어서 현장 발전소에서 구입할 모듈의 수량 결정에 어려움이 많았다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 보유 모듈 수량에 따라서 제어시스템을 얼마나 안정적으로 사용할 수 있는지 평가하기 위한 평가척도를 제시하고, 제시한 평가척도를 기초로 모듈의 수명을 고려하여 목표하는 사용기간동안 사용할 적정 예비모듈 수를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한, 제시한 방법을 적용하여 보령화력 발전소 1호기 보일러 제어시스템의 예비모듈 수를 결정한 사례를 제시하였다.

2. 모듈의 MTBF 추정

모듈의 수명을 고려하여 적정한 예비모듈 수를 결정하기 위해서는 먼저 모듈의

MTBF (Mean Time between Failure)에 대한 데이터가 필요하다. 모듈의 MTBF에 대한 데이터를 얻을 수 있는 방법으로서 다음과 같은 세 가지 방법을 들 수 있다. 첫 번째는 MIL-HDBK-217(1995)에 의한 예측방법을 통하여 모듈의 MTBF를 계산하는 것이고, 두 번째는 가속수명시험을 실시하고, 시험데이터로부터 모듈의 MTBF를 추정하는 방법이며, 마지막으로 세 번째는 이력데이터를 이용하여 모듈의 MTBF를 추정하는 방법이다. 이 세가지 방법을 적용하는데 있어서 공통적으로 모듈의 수명은 식 (1)과 같은 확률밀도함수를 갖는 지수분포를 따른다고 가정한다.

$$f(t) = (1/\theta) \exp(-t/\theta) \quad (1)$$

단, θ 는 모듈의 MTBF이다. 이와 같은 가정 하에서 첫 번째 방법인 MIL-HDBK-217에 의한 예측방법은 제조업체로부터 정확한 설계 자료를 얻을 수 없는 상황에서 식 (2)와 같이 모듈의 고장율을 계산하여 계산된 고장율의 역수를 취함으로써 모듈의 MTBF를 구하는 부품 수 방법(Part Count Method)을 사용하게 되는데, 이 때 품질팩터를 어떻게 정해주는가에 따라서 MTBF가 크게 차이가 날 수 있으며 이론적으로 계산할 때 가정한 사용환경 및 부품의 직, 병렬 연결관계 등이 실제 조건과 차이가 있어 계산된 MTBF가 현실과 차이가 있을 수 있다.

$$\lambda_{\text{mod}} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda_{gi} \cdot \pi_{Qi} \quad (2)$$

단, λ_{mod} 는 모듈의 고장률, n_i 는 i 번째 종류 부품의 수량, N 은 부품의 종류 수, λ_{gi} 는 i 번째 종류 부품의 일반 고장률, π_{Qi} 는 i 번째 종류 부품의 품질팩터이다. 두 번째의 가속수명시험에 의하여 모듈 MTBF를 구하는 방법은 다음과 같다. 모듈의 최대 허용 사용온도에서 여러 개의 모듈을 시험하여 고장데이터를 얻은 후 시험한 데이터를 이용하여 식 (3)과 같이 시험조건에서의 MTBF를 계산한다.

$$\theta_A = \left\{ \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)T \right\} / r \quad (3)$$

단, θ_A 는 시험조건에서의 모듈 MTBF, t_i 는 i 번째 모듈의 고장시간, T 는 시험시간, r 은 고장 수, n 은 시험한 모듈 수이다. 시험조건에서의 MTBF를 계산한 후 부품의 온도 가속계수 정보로부터 모듈의 온도 가속계수를 계산하고, 계산된 모듈의 온도 가속계수를 시험조건에서의 MTBF에 곱하여 정상 사용조건에서의 모듈 MTBF를 구한다[3, 5, 6]. 이와 같은 방법은 단가가 높은 모듈을 여러 개 시험해야 하기 때문에 모듈의 MTBF를 구하는데 많은 시험비용이 소요된다.

그러므로 장기 사용한 제어시스템 구성 모듈의 MTBF를 구하는데 있어서 이력데이터를 잘 관리하여 이력데이터를 활용하는 방법이 가장 바람직하다. 여러 발전소의 장기 사용한 제어시스템에 대한 이력데이터를 조사해 본 결과 발전소의 자재불출대장을 통하여 이력데이터를 구할 수 있었고, 이 때 이용 가능한 이력데이터의 형태는 <표 1>과 같았다. 이와 같은 형태의 고장데이터를 이용하여 다음과 같이 모듈의 MTBF를 추정할 수 있다.

모듈의 수명이 식 (1)과 같은 확률밀도함수를 갖는 지수분포를 따른다는 가정 하에서 일정 기간 T 동안 어느 한 모듈의 고장회수 X 는 식 (4)와 같은 확률질량함수 (Probability Mass Function)를 갖는 포아송분포를 따른다.

$$P(X=x) = m^x e^{-m} / x! \tag{4}$$

단, $m = T/\theta$ 이다. 그러므로 동일한 유형의 모듈이 n 개 있는 경우 T 동안 n 개 모듈의 고장회수 합 Y 는 식 (5)와 같은 확률질량함수를 갖는 포아송분포를 따른다.

$$P(Y=y) = (nm)^y e^{-(nm)} / y! \tag{5}$$

< 표 1 > 고장데이터 형태

종류	수량	고장수				총 고장수
		S년	S+1년	...	S+T년	
모듈 1	n_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{T1}	$f_{.1} = \sum_{k=1}^T f_{k1}$
모듈 2	n_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{T2}	$f_{.2} = \sum_{k=1}^T f_{k2}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
모듈 N	n_N	f_{1N}	f_{2N}	...	f_{TN}	$f_{.N} = \sum_{k=1}^T f_{kN}$

식 (5)와 같은 포아송분포로부터 MTBF θ 의 최우추정치(Maximum Likelihood Estimator)는 식 (6)과 같이 구해진다.

$$\hat{\theta} = nT/y \tag{6}$$

그러므로 <표 1>과 같은 고장데이터로부터 각 모듈의 MTBF θ_i 는 식 (7)과 같이 추정된다.

$$\hat{\theta}_i = n_i T / f_{.i} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

3. 적정 예비모듈 수 결정방법

적정 예비모듈 수를 결정하기 위해서는 모듈의 MTBF 데이터와 함께 앞으로 얼마나 더 사용할 것인가, 즉, 목표 사용기간이 정해져야 하고, 목표 사용기간동안 제어시스템을 얼마나 안정적으로 사용할 수 있는지 평가하기 위한 평가척도가 필요하다. 이때, 목표하는 사용기간은 발전소를 구성하는 다른 설비들의 수명을 고려하여 결정한다. 다른 설비들의 잔여수명이 5년밖에 안 남은 상황에서 제어시스템만 더 오래 사용할 수 있다는 것은 무의미하므로 다른 설비들의 잔여수명을 고려하여 목표 사용기간을 정한다. 목표 사용기간동안 제어시스템을 얼마나 안정적으로 사용할 수 있는지 평가하기 위한 평가척도는 먼저 안정적이라는 용어의 의미를 명확하게 정할 필요가 있다. 여기서 안정적이라고 하는 것은 목표하는 사용기간동안 예비모듈이 모두 소모되어 더 이상 제어시스템을 사용할 수 없게 되는 상황이 발생할 가능성이 적음을 의미한다. 제어시스템은 독립된 기능을 갖는 모듈들로서 구성되어 있고, 어느 한 모듈이라도 고장이 나면 제어시스템을 정상적으로 가동할 수 없다고 할 때, 즉, 모듈들이 직렬로 연결되어 있다고 가정할 때, 안정성에 대한 평가척도로서 식 (8)과 같은 확률을 사용할 수 있다.

$$P(L) = 1 - \prod_{i=1}^N P[f_{.i}(L) \leq s_i] \quad (8)$$

단, $P(L)$ 은 목표 사용기간 L 내에 예비모듈이 모두 소모된 모듈에서 고장이 발생하여 더 이상 제어시스템을 사용할 수 없게 될 확률(이 확률을 위험확률이라고 정의한다), $f_{.i}(L)$ 은 L 기간동안 n_i 개의 모듈 i 에 있어서 예상되는 총 고장수, s_i 는 모듈 i 의 예비모듈 수, N 은 모듈의 종류 수이다. 이 때, 모듈 i 의 고장이 L 시간 내에 보유 예비모듈 수 이하로 발생할 확률 $P[f_{.i}(L) \leq s_i]$ 는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$P[f_{.i}(L) \leq s_i] = \sum_{x=0}^{s_i} (n_i m_i)^x e^{-(n_i m_i)} / x! \quad (9)$$

단, n_i 는 모듈 i 의 수, m_i 는 t/θ_i , θ_i 는 모듈 i 의 평균수명(MTBF)이다.

적정 예비모듈 수는 미리 허용하는 위험확률의 상한값 P_c 를 정하고, 위험확률이 식 (10)과 같이 P_c 이하가 되는 최소 예비모듈 수로 결정한다.

$$P(L) = 1 - \prod_{i=1}^N P[f_{.i}(L) \leq s_i] \leq P_c \quad (10)$$

이 때, 예비모듈이 부족하게 될 가능성을 각 모듈에 고르게 배분하여 각 모듈에 있어서 $P[f_{.i}(L) \leq s_i]$ 를 동일하게 정한다면 식 (10)은 식 (11)과 같이 된다.

$$P[f_{.i}(L) \leq s_i] \geq \sqrt[N]{1 - P_c} \quad (11)$$

식 (11)을 만족하는 최소 예비모듈 수는 시행착오법(trial and error method)을 이용하여 구할 수 있다.

4. 사례

보령화력발전소의 제1호기 보일러 제어시스템은 1983년 설치되어 1998년까지 15년 동안 사용되어 왔다. 보령화력발전소 제1호기의 폐지시기는 2015년으로 앞으로 17년을 더 사용할 계획이다. 현재 사용되고 있는 보일러 제어시스템은 제조업체에서 모델을 바꾼지 오래된 시스템으로서 현재는 모듈을 구입할 수 있지만 곧 생산이 중단될 것으로 예상되는 시스템이다. 이와 같은 상황에서 현재 사용하고 있는 제어시스템을 계속 사용하기 위해서는 17년동안 사용할 예비모듈의 적절한 수량을 정할 필요가 있었다. 이러한 필요에 의하여 본 논문에서 제시한 방법을 적용하여 적절한 예비모듈 수를 결정하였다.

보령화력발전소의 자재불출대장[1]으로 부터 보일러 제어시스템의 모듈 고장 이력을 조사하여 각 모듈의 MTBF를 추정된 결과 <표 2>와 같았다. 추정된 <표 2>의 모듈 MTBF와 식 (11)을 이용하여 허용 위험확률이 각각 0.1, 0.3, 0.5일 때의 적정 예비모듈 수를 구하고, 구한 결과를 <표 3>에 나타내었다. 단, 적정 예비모듈 수를 결정할 때 보령화력 발전소의 1호기와 2호기가 동종의 시스템으로 공통으로 예비모듈을 사용하고 있으므로 1호기와 2호기에 대한 적정 예비모듈 수를 계산하였다. <표 3>에는 추가적으로 <표 2>의 모듈 MTBF를 기초로 목표 사용기간인 17년간 기대 고장수를 계산하여 포함시켰다. <표 3>에서 n_i 는 1호기와 2호기의 보일러 제어시스템에 포함된 i 번째 모듈의 수량, s_i 는 i 번째 모듈의 보유 예비모듈 수, $E[f_{.i}]$ 는 i 번째 모듈의 17년간 기대 고장수, s_i^* 는 목표 사용기간동안 제어시스템을 안정적으로 사용하기 위하여 필요한 i 번째 모듈의 적정 예비모듈 수, $s_i^* - s_i$ 는 추가적으로 구입해야 할 예비모듈 수이다. <표 3>에서 결정된 적정 예비모듈 수를 살펴보면 모듈 수량이 많을수록, MTBF가 짧을수록 적정 예비모듈 수가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 적정 예비모듈 수와 기대 고장수를 비교해 보면 허용 위험확률이 0.5일 때도 적정 예비모

들 수가 기대 고장수보다 큰 것을 볼 수 있다. 모듈의 MTBF을 고려하여 예비모듈 수를 정하는 경우 기대 고장수만큼 예비모듈 수를 정하는 것을 일반적으로 생각할 수 있지만, 기대 고장수만큼의 예비모듈을 보유하는 경우 위험확률은 0.5보다 크게 나타난다.

< 표 2 > 보일러 제어시스템 모듈의 MTBF 추정결과

번호	카드명	MTBF(년)	번호	카드명	MTBF(년)
1	Derivative	25	15	Power Drive Convertor	86.56
2	Multiplier (Sprit type)	74.12	16	Pulser	15
3	Multiplier (Error type)	24	17	Power Supply Monitor	12
4	Square Root Extractor	87	18	24VDC Auxiliary Relay	280.91
5	2 Input Auctioneer	79.41	19	118VAC Auxiliary Relay	82.5
6	3 Input Auctioneer	51.82	20	Transfer Relay	127.5
7	Signal Limiter	126	21	Transfer Relay, TDOE	168
8	Signal Generator	120	22	TRI - Stable Relay	107.5
9	Signal Monitor	124.09	23	Summer+Bias+Inverter	180.83
10	E/I Convertor	385.38	24	Summer+Bias+Intergral	54
11	Function Generator	106.88	25	Summer+Bias+Prop+Intergral	75.79
12	Rate Limited Signal Follower	129.84	26	24VDC Auxiliary Relay-A	3570
13	Analog Memory	57.27	27	Current Buffer Card	172.5
14	Signal Lag	80			

< 표 3 > 적정 예비모듈 수

i	모듈명	n_i	s_i	$E[f_i]$	P _C =0.1		P _C =0.3		P _C =0.5	
					s_i^*	$s_i^* - s_i$	s_i^*	$s_i^* - s_i$	s_i^*	$s_i^* - s_i$
1	Derivative	10	2	7	15	13	13	11	12	10
2	Multiplier (Sprit type)	84	7	20	32	25	30	23	28	21
3	Multiplier (Error type)	8	7	6	13	6	12	5	11	4
4	Square Root Extractor	58	7	12	21	14	20	13	18	11
5	2 Input Auctioneer	90	14	20	32	18	30	16	28	14
6	3 Input Auctioneer	38	14	13	23	9	21	7	20	6
7	Signal Limiter	42	7	6	13	6	12	5	11	4
8	Signal Generator	64	4	10	18	14	16	12	15	11
9	Signal Monitor	182	25	25	39	14	37	12	35	10
10	E/I Convertor	334	3	15	26	23	24	21	23	20
11	Function Generator	114	12	19	30	18	28	16	27	15
12	Rate Limited Signal Follower	6	3	1	4	1	3	0	3	0
13	Analog Memory	126	4	38	55	51	52	48	50	46
14	Signal Lag	16	1	4	9	8	8	7	7	6
15	Power Drive Convertor	4	2	1	4	2	3	1	3	1
16	Pulser	2	0	3	7	7	6	6	6	6
17	Power Supply Monitor	4	4	6	13	9	12	8	11	7
18	24VDC Auxiliary Relay	206	5	13	23	18	21	16	20	15
19	118VAC Auxiliary Relay	88	2	19	30	28	28	26	27	25
20	Transfer Relay	204	10	28	42	32	40	30	38	28

< 표 3 > 적정 예비모듈 수 (계속)

i	모듈명	n_i	s_i	$E[f_i]$	Pc=0.1		Pc=0.3		Pc=0.5	
					s_i^*	$s_i^* - s_i$	s_i^*	$s_i^* - s_i$	s_i^*	$s_i^* - s_i$
21	Transfer Relay, TDOE	56	0	6	13	13	12	12	11	11
22	TRI - Stable Relay	86	79	14	24	0	23	0	21	0
23	Summer+Bias+Inverter	434	1	41	59	58	56	55	54	53
24	Summer+Bias+Intergral	18	6	6	13	7	12	6	11	5
25	Summer+Bias+Prop+Intergral	96	6	22	35	29	33	27	31	25
26	24VDC Auxiliary Relay-A	238	100	2	5	0	4	0	4	0
27	Current Buffer Card	184	6	19	30	24	28	22	27	21

5. 결론

본 논문에서는 독립된 제어모듈들로서 구성된 제어시스템의 적정 예비모듈 수를 구하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 적정 예비모듈 수의 계산방법에서는 위험확률이라고 하는 평가척도를 제시하여 예비모듈 수량을 결정할 때 목표하는 사용기간동안 제어시스템을 얼마나 안정적으로 사용할 수 있는가를 정량적으로 평가할 수 있도록 하였으며, 모듈의 MTBF를 고려하여 예비모듈 수를 결정함으로써 목표 사용기간동안 일부 모듈은 예비모듈이 많이 남고, 일부 모듈은 예비모듈이 모자라는 불균형적인 상황의 발생 가능성을 줄였다.

본 논문에서 제시한 방법에 있어서는 경제성을 고려하지 않고 허용 위험확률은 현장에서 미리 결정되는 것으로 가정하였다. 하지만, 허용 위험확률을 어떻게 결정하는가에 따라서 예비모듈을 확보하는데 소요되는 비용이 달라진다. 발전소에서는 허용 위험확률이 적으면 적을수록 좋으나 위험확률이 적어지는 경우 적정 예비모듈 수가 커져 비용이 커지게 된다. 향후 경제성을 고려하여 적정 위험확률 Pc를 결정하는 것이 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 보령화력 발전소 자재불출대장.

- [2] Criscimagna, N. and Unkle, R.(1995), *Service Life Extension Assessment*, RAC.
- [3] Hart, L.(1987), "Reliability of an Electronic Assembly: A Case History," *IEEE Trans. On Reliability*, Vol. 36, pp. 385-389.
- [4] MIL-HDBK-217F(1995), *Reliability Prediction of Electronic Equipment*.
- [5] Moura, E.C.(1992), "A Method to Estimate the Acceleration Factor for Subassemblies," *IEEE Trans. On Reliability*, Vol. 41, pp. 396-399.
- [6] Seager, J.D.(1988), "A Method to an Average Activation Energy for Subassemblies," *IEEE Trans. On Reliability*, Vol. 37, pp. 458-564.