

**발전소 제어설비의 신뢰성 평가를 이용한 최적 개조방안 도출(보령화력 사례)**

신윤오, 정창기  
전력연구원

**The study of retrofit method for the used control system of power plants to improve its reliability**

Yoon-oh Shin, Chang-ki Jung  
Korea Electric Power Reserch Institute

**Abstract** - All equipment generally has a specified design service life. As an equipment nears the end of its design service life, replacement must be considered. In some cases, it is possible and more economical to continue the usage of the existing equipment for a longer period. So, replacement should be carefully decided considering the feasibility and economic benefits of the existing equipments' life extension. In this paper, assessment procedure for deciding between life extension and replacement of the electronic control system is presented with an application example. In particular, estimation of the electronic control system's remaining life is focused on.

**1. 서 론**

제어시스템의 신뢰성 평가 절차는 해당 제어시스템의 정특성시험, 동특성시험, Governor Free 시험을 통하여 성능 정상여부를 확인하고, 제어시스템의 주요 모듈을 선정하여 가속수명시험을 실시하고 모듈의 열화 여부를 평가한다. 모듈의 열화여부를 평가한 후 열화되지 않는 경우에는 모듈의 우발고장을 고려하여 제어시스템의 고장 이력 데이터로부터 모듈의 교체 회수를 분석하고, 분석된 데이터로부터 제어시스템을 폐지시기까지 사용하는 데 현재의 예비모듈수가 적절한지 평가하여 추가적인 예비모듈이 필요한 경우 적절한 예비모듈수를 산출한다. 제어시스템의 성능 및 신뢰성평가로부터 제어시스템을 폐지시기까지 사용할 수 없다고 판단되는 경우 제어시스템을 교체하고, 계속 사용할 수 있다고 판단되는 경우 기존의 제어시스템을 계속 사용하는 경우와 교체하는 경우에 대한 경제성평가를 수행하고 경제성평가를 통하여 최적 개조방안을 도출한다.

**2. 본 론**

**2.1 시스템 분석**

**2.1.1 보일러제어 시스템**

미국 Bailey사에서 제작한 Bailey 820 Electronic Analog Control System은 1960년대에 IC(Integrated Circuit)를 제어 System에 도입한 전자식 제어시스템으로 개발되어 그때까지 주로 사용하던 공기식 제어장치(Pneumatic Control System)를 대체한 발전소 제어장치의 대표적인 System으로 1980년대까지 전세계적으로 폭넓게 사용되어 왔다. Bailey 820 Electronic Analog Control System은 전기식과 전자식을 조합한 Process Control System으로 Set Point에 따라 변화하는 출력을 만들어 내어 Process를 제어한다. 820 System의 주요 부분은 Transducer, Control System, Operator Interface System,

Final Control Element 등 4개 분야로 구성되어 있다.

**2.1.2 버너제어 시스템**

미국 Bailey사에서 제작 공급한 Bailey 861 Burner Control System은 Automatic Sequence Control를 할 수 있도록 820 Analog Fuel & Air Control System과 Interlock되어 있으며 Master Fuel Trip과도 서로 Interlock되어 있다. 또한 운전원으로 하여 연소기 즉, Fuel & Coal Burner, Primary Air Flow, Swing Valve, Pulverizer, Raw Coal Feeder, Feeder Inlet/Outlet Gate등에 있어서 운전 및 정지, 점화 및 소화 상태를 쉽게 감시할 수 있도록 설계되어 있다.

**2.1.3 터빈제어 시스템**

터빈제어 시스템은 터빈 기동 및 운전시 터빈의 각 Detector로부터 온도, 진동, 속도, 변위 등의 신호를 받아 안전하고 정격운전에 필요한 정보를 주며 Data의 기록 유지 및 비상시에는 경보 또는 Trip 신호를 내는 장치이다. 이 시스템의 기본구성은 검출부, Power Unit, 각 Channel을 위한 Recorder로 구성되며 부수적으로 원격지시계와 기타 부속품(Junction Box, Flexible Coupling, 편심계를 위한 Power supply, Indicator Lamp 등)들이 사용되어지고 있다.

**2.1.4 운전용 전산기 설비**

발전소의 운전에 필요한 Data의 기록과 분석, 기록 및 지시, Unit Trip시 원인분석, 각종 효율계산을 위하여 설치되어 있으며 32K Word(16Bit) Digital Computer로써 Westing House W2,500F Proteus Computer System이다. 특히 보령화력 1, 2호기는 ATS(Automatic Turbine Start-up & Shutdown) System이 있어 Computer Program에 의하여 TBN 자동기동과 정지를 제어하는 기능을 가진 System이다.

**2.1.5 시스템 운용 환경**

제어시스템의 운용 환경 중에서 제어시스템의 신뢰성에 크게 영향을 미치는 온도, 습도, 입력전압을 측정장비를 이용하여 측정된 결과 제어시스템이 일정한 환경에서 관리되고 있음을 알 수 있었다.

**2.2 성능평가**

**2.2.1 정특성 시험**

<표1>에서 보듯이 주증기 압력은 266MW 부하에서 정격168.0kg/cm<sup>2</sup> 대비 162.8kg/cm<sup>2</sup>으로 적정치 ±5.0kg/cm<sup>2</sup>을 0.2kg/cm<sup>2</sup> 벗어 났으나 양호한 편이었으며 503MW에서는 166.5kg/cm<sup>2</sup>으로 적정치 이내로 주증기 온도는 시험 부하대에서 기준치(538±16℃) 이내로 유지되었음. 재열증기 온도는 시험 부하대에서 기준치(538±8℃) 이내로 드럼 레벨은 시험 부하대에서 기준치(±100 mm) 이내 유지됨. Gas O<sub>2</sub> 는 보일러 부하 266MW에서 Gas Outlet O<sub>2</sub> 6.6%로 기준치 5.0%에 비해서 다소 높았으나 503MW에서는 2.5% 로 기준치 이내로 유지되었음.

<표 1> 제어설비 운전상태

항목	단위	정격치	제어 목표치	266 MW	503 MW	비고
주중기압력	kg/cm <sup>2</sup>	168	±5	162.8	166.5	
주중기유량	ton/h	1601	-	760	1510	
주중기온도	℃	538	±16	538.8	537.9	
재열증기온도	℃	538	±8	533.2	533.8	
드럼레벨	mm	±0	±100	-6.4	-7.3	±300 Trip
O <sub>2</sub>	%	1~5	1~5	6.6	2.5	

2.2.2 동특성 시험

<표2>의 동특성 시험 결과에서 보듯이 주중기 온도, 드럼레벨에 대한 제어상태는 매우 양호함. 주중기 압력의 변동폭은 그다지 크지 않으나 전반적으로 다소 낮게 운전됨. 재열증기 온도의 경우 하한치를 벗어나서 상당히 낮게 운전되므로 조정이 필요함.

2.2.3 Governor Free 시험

Governor Free를 470MW, 440MW, 400MW, 370MW부하에서 속도조정을 실시하기 위하여 Memory Hi-Corder (HIOKIE 8825)를 사용하여 기록 분석한 결과 <표 3>과 같이 5~9%의 속도조정이 실측되었고 평균 6.43 %로 목표치인 7%이내에 들었고 속도조정에 대한 불감대는 평균 0.015 Hz 정도로 분석되었다. 이는 목표 제어치(0.02Hz)이내에서 동작되고 있음을 알 수 있다.

<표 2> 동특성 시험결과

항목	단위	정격치	제어 목표치	부하변동(MW)			비고
				253	496→	276→	
주중기 압력	kg/cm <sup>2</sup>	168	±5	→512	254	506	
주중기 온도	℃	538	±16	+1.0	+0.8	+0.4	
재열증기 온도	℃	538	±8	-13.5	-7.8	-10.5	
드럼레벨	mm	±0	±100	+2.2	+4.9	+6.5	
				-8.1	-8.2	-9.1	
				+0	+1.7	+0	
				-27.7	-12.5	-22.6	
				+21.8	+32.4	+27.7	±300 Trip
				-28.3	-43.0	-61.1	

<표 3> Governor Free 시험결과

부하대 (MW)	시험 시간	속도조정율 (%)			변화량		ΔMW /0.1Hz
		설정치	실측치	평균치	Δf (Hz)	ΔMW	
470	13:35 ~ 14:20	4.5	5.13	5.35	0.1008	16.25	16.24
			5.48		0.12012	18.25	15.20
			5.44		0.08004	12.25	15.31
440	14:45 ~ 15:17	4.5	6.54	6.08	0.10008	12.75	12.74
			6.17		0.09996	13.50	13.50
			5.55		0.06000	9.0	15.01
400	15:44 ~ 16:13	4.5	7.84	7.05	0.08004	8.5	10.62
			7.40		0.09996	11.25	11.26
			5.92		0.08004	11.25	14.07
370	16:56 ~ 17:11	4.5	6.32	7.24	0.06000	7.9	13.18
			6.79		0.07992	9.8	12.27
			8.62		0.06000	5.8	9.66

2.3 신뢰성 평가

2.3.1 이론적 수명예측 (Part Count Method)

가속수명시험에 앞서 비교적 간단한 이론적 수명예측 방법으로 모듈의 신뢰도를 예측하였다. 이론적 수명예측 자료 자체가 모듈이 가지는 고유의 신뢰도를 정확하게 나타내지는 못하지만, 모듈간의 상대적인 신뢰도 비교에는 효과적이고, 가속수명시험의 대상모듈 선정을 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있다.

MIL-HDBK-217'4의 신뢰도 예측방법에는 부품 스트레스 분석방법(Part Stress Analysis, PSA)과 부품

수 방법(Part Count Method, PCM)이 있다. 본 발전소에서는 모듈 부품에 관한 상세한 정보를 입수하기가 어렵기 때문에 PCM법을 이용하여 각 모듈의 고장률과 평균수명을 예측하였다.

부품의 고장률은 부품 재료의 특성 안정, 공정 개선 등으로 대개 생산되는 시점에 따라 고장률이 변하게 된다. MIL-HDBK-217은 시간이 경과함에 따라 갱신되어 제정 당시의 고장률을 제공하고 있다.

모듈은 대개 집적 회로, 개별 반도체, 콘덴서, 저항, 커넥터, 회로 기관, 릴레이, 퓨즈 등 많은 부품으로 구성되어 있다. 모듈의 고장률을 구하기 위해서는 모듈을 이루고 있는 전체 부품의 고장률을 합산하여야 한다. 하지만 전체 부품에 대한 정보를 수집하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 고장률이 높은 주요 부품의 고장률을 이용하여 시스템의 고장률을 계산하였다. 여기서는 시스템의 고장률을 산출하기 위해서 집적 회로, 개별 반도체, 커패시터, 릴레이의 고장률을 이용하였다. 이와 같은 부품의 선택은 일본 전기공업회에서 조사한 전력용 제어 시스템에 있어서 고장률이 높은 전자부품의 순위를 참고한 것이다.

시스템을 이루고 있는 각 모듈들의 고장률을 산출하기 위해서는 각 모듈의 부품 리스트를 작성하여야 한다. 각 모듈의 부품 리스트는 매뉴얼에 있는 경우도 있으나 신뢰도 예측에 필요한 모든 정보가 수록되어 있지 않기에 직접 육안으로 모듈의 부품을 확인하여 부품 리스트를 작성하였다.

각 부품의 고장률은 부품의 종류에 따라서 결정된다. 예를 들면, 집적 회로인 경우 제조 기술이 MOS(MOS) 인가 바이폴라(Bipolar)인가에 따라서 고장률이 달라진다. 또 집적회로의 집적도(트랜지스터의 수 또는 게이트의 수)에 따라 고장률이 다르다. 그러므로 부품의 정확한 고장률을 계산하기 위해서는 각 부품의 세부내용을 알아야 하지만, 부품 리스트나 육안을 통한 확인에 의하여 이러한 세부내용을 모두 확인하기가 어렵다. 따라서 육안으로 확인이 가능한데까지 분류하고, 분류된 부품에 들어가는 부품의 고장률을 평균하여 대표 고장률을 산출하였다. 고장률을 평균하는 방법은 기하 평균을 이용하였는데 이는 각 고장률의 산포가 클 경우 대표 고장률이 특정 고장률 값에 크게 영향을 받지 않게 하기 위해서이다. 기하 평균은 아래식과 같이 표현된다.

$$\lambda_c = [\prod \lambda_i]^{1/n}$$

단,  $\lambda_c$  는 분류된 부품의 고장률,  $n$ 은 분류된 부품에 포함되는 부품 종류의 수,  $\lambda_i$ 는 분류된 부품에 포함되는 부품의 고장률이다.

2.3.2 가속수명 데이터 이용하는 방법

보령화력발전소 제어모듈의 가속수명시험을 실시하기 위한 해당모듈을 선정하기 위하여 다음과 같은 원칙에 따라서 해당모듈을 선정하였다.

- 고장이력이 많은 것
- 중요도가 높은 것
- 설치수량이 많은 것
- 예비품수가 많은 것

고장이력데이터로부터 각 모듈의 평균 고장수를 아래와 같이 계산한다.

$$\text{평균고장수} = \frac{\text{모듈의 고장수의 합}}{\text{설치된 모듈수}}$$

그리고 가속수명용 모듈의 선정방법은 다음 식에 따라 우선 순위를 정한다.

$$\text{선정지수} = \text{평균 고장수} \times \left( \frac{\text{설치모듈수량}}{\text{전체모듈수량}} \right) \times \left( \frac{\text{예비부품수량}}{\text{전체예비부품수량}} \right) \times 100\%$$

위에서 선정지수가 높은 순으로 모듈을 선정하되 유사 모듈이 중복되거나 예비모듈공급에 문제가 있는 경우는 차순위의 모듈을 선정하도록 한다.

가속수명시험 결과 Set Point Station과 Auxiliary relay 모듈을 제외한 모듈은 특성에 변화가 없음을 알

았다. 부품차원에서 특성을 측정된 결과에서는 AI 전해 커패시터와 릴레이에 있어서 고장이 발생하였다. 그러므로 AI 전해 커패시터와 릴레이는 주기적인 교체가 필요할 것으로 판단된다.

### 2.3.3 시스템의 이력분석과 예비모듈

지금까지의 제어시스템 운전이력을 이용하여 각 모듈의 신뢰도(MTBF)를 예측하고, 예측된 신뢰도와 현재 시스템이 가지고 있는 예비모듈수를 감안하여 발전소의 목표수명까지의 사용 가능 여부를 판단한다. 목표수명까지 안정적으로 운영하기 위하여 필요한 예비모듈의 수를 산출하고, 현재 보유하고 있는 예비모듈의 수가 부족한 경우는 추가로 구입해야 할 예비모듈을 제시한다.

### 2.4 시스템 개조대안

현재 사용중인 제어시스템 중 보일러제어시스템의 동특성시험에서 재열증기 온도의 경우 제한치를 벗어나 운전되고 있는 것으로 판정되었고, 그 외의 경우는 제어특성이 제한치를 크게 벗어나 운전되고 있지 않은 것으로 조사되었다. 하지만, 현재 사용하고 있는 보일러 제어시스템과 같은 모델이 제조업체에서 주문생산을 하고 있으며 주문생산도 곧 중단될 것으로 예상되기 때문에 계속 사용할 경우 적정한 예비모듈을 확보해 두어야 한다.

그래서 첫 번째 대안은 적절한 예비모듈을 확보하여 현재의 보일러 제어시스템을 계속 사용하는 것으로 정하였다. 단 전산설비의 경우는 교체되어야 할 것으로 판단된다. 현 전산설비는 Westing House W2,500F Proteus Computer System으로 구축되어 있고, 전산설비의 고장이력데이터를 분석한 결과 고장이 잦은 것으로 나타났다. 또한 동일 제품의 생산이 중단되어 예비품의 구입이 불가능하며 대체품의 구입 또한 원할치 못한 상태에 있다. 그리고 CPU의 Back-Up이 안되고 있으며 이중화(redundancy)구조가 없는 관계로 CPU 고장시 데이터 로깅이 불가능한 상태에 있으므로 전산설비는 조속히 교체되어야 할 것으로 판단된다.

두 번째 대안은 ABC, BMS, EHC 및 전산설비를 DCS로 교체하는 것으로 하였다.

<표 3>에 개조대안을 정리해 놓았다.

표 3 개조대안

구분	1안	2안
보일러	1. ABC(보일러주제어설비)의 820 Module의 충분한 예비모듈을 확보하여 계속사용. 2. 기존 BTG Board 운전 방식 채용	1. ABC를 DCS로 전체 교체 2. CRT운전방식으로 변경하고 기존 BTG Board 철거
버너	1. BMS(버너제어설비)의 861 Module의 충분한 예비모듈을 확보하여 계속사용	1. BMS를 새로운 DCS에 수용
BOP	1. BOP(보조설비의 제어를 위한 Relay 큐비클은 정상보수를 통하여 유지 보수되고 있으므로 일부 기기에 대한 예비모듈을 확보하여 계속사용	1. BOP 제어를 새로운 DCS에 수용
DAS/ SOE	1. 노후된 기존의 전산설비를 새로운 설비로 교체	1. DAS/SOE를 새로운 DCS에 수용
터빈	기존의 설비의 예비모듈을 확보하여 계속사용	1. 노후된 기존의 전자식 Governor를 DEHC(디지털 제어)로 교체한다.
현장 계기	1. 현장계기는 정상보수를 통하여 계속 유지보수되고 있으므로 기존 설비를 그대로 사용하고 현존 문제가 있는 계기만 교체하도록 한다.	1안과 동일
기타	운전방식은 현재의 중간 부하 담당 방식 채택	운전방식은 현재의 중간 부하 담당 방식 채택

### 2.5 경제성 평가

기존의 제어시스템을 계속 사용하는 경우와 교체하는 경우의 경제성을 평가해본 결과 정량적분석에서는 제어시스템을 교체함으로써 투자되는 초기비용을 운영비용 절감액으로 회수하지 못하는 것으로 나타났다. 이자율 연12%, 인건비상승률 연5%, 연료비 상승률 연5%라는 기본 가정하에서 자본회수율이 45%정도 되었으며, 제

어시스템에 대한 건적, 열효율 향상, 연료비 상승률, 인건비 상승률, 이자율, 예비모듈 관련 비용에 대한 영향을 고려하여 민감도분석을 실시한 결과에서도 제어시스템을 교체하는 경우 41% ~ 55%정도의 자본만이 회수되는 것으로 나타났다. 그러므로 정량적인 분석 결과만을 고려할 때는 기존의 제어시스템을 계속 사용하는 것이 더 경제적이다.

### 3. 결론

성능평가 후 제어시스템을 폐지시기까지 계속 사용할 수 있는가를 평가하기 위하여 제어모듈의 특성 열화 경향을 시험해 보았다. 각 모듈에 대한 수명예측을 통하여 각 모듈의 설계수명을 산출하고, 산출된 설계수명과 모듈의 중요도 등을 기준으로 보일러 제어시스템 모듈 5개, 터빈 제어시스템과 버너 제어시스템 각각 2개씩을 선정하여 가속수명시험을 실시하였다. 가속수명시험에 사용한 모듈은 10년 이상 사용해온 모듈로서 90℃에서 1000시간 시험하였다. 시험결과 보일러 제어시스템의 Set Point Station모듈과 Auxiliary Relay모듈이 168시간 전에 고장났으며 다른 모듈들에 있어서는 특성의 열화가 보이지 않았다. 고장난 부품을 살펴보면 AI 전해 커패시터와 릴레이로서 이 부품들은 마모고장을 일으키는 것으로 알려진 부품이다. 그러므로 AI 전해 커패시터와 릴레이는 주기적인 교체가 필요할 것으로 판단된다. 모듈의 우발성 고장을 고려하여 모듈의 교체 이력을 분석하고, 분석된 결과를 토대로 현재 보유하고 있는 예비모듈을 이용하여 폐지시기까지 안정적으로 사용할 수 있는지 평가하였다. 평가 결과 추가적인 예비모듈이 필요한 것으로 분석되어 모듈의 교체 이력을 분석한 결과를 이용하여 폐지시기까지 필요한 적정 예비모듈수를 계산하였다. 하지만 전산설비의 경우에는 모듈의 생산이 중단되어 추가적으로 예비모듈을 구입할 수 없어 적정 예비모듈수를 계산하지 않았다.

성능 및 신뢰성평가를 통하여 기존의 제어시스템은 전산설비를 제외하고는 추가적인 예비모듈을 구입하는 경우 계속 사용할 수 있었으므로 개조대안으로서 전산설비만 교체하고 다른 제어시스템은 추가적으로 예비모듈을 확보하여 계속 사용하는 안과 전체 제어시스템을 교체하는 안을 고려하였다.

기존의 제어시스템을 계속 사용하는 안과 교체하는 안에 대한 경제성을 평가한 결과는 폐지시기까지 초기 투자비용의 45%정도만을 회수하는 것으로 분석되었고, 제어시스템에 대한 건적, 열효율 향상, 연료비 상승률, 인건비 상승률, 이자율, 예비모듈 관련 비용에 대한 영향을 고려하여 민감도분석을 실시한 결과에서도 제어시스템을 교체하는 경우 41% ~ 55%정도의 자본만이 회수되는 것으로 나타났다. 그러므로 정량적인 분석 결과만을 고려할 때는 기존의 제어시스템을 계속 사용하는 것이 더 경제적이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 박정원, "제어모듈의 신뢰성 평가", 1998 대한전기학회 학회 학술대회 논문지, B권, 614페이지, 1998년
- [2] 전력연구원, "보령화력 1호기 제어설비의 최적 개조방안", 1999년
- [3] MIL-HDBK-217D, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1982
- [4] P.A.Tobias & D.C. Trindade, "Applied reliability, Van Nostrand Reinhold Company Inc.", 1986
- [5] RAC, "Nonoperating Reliability Databook", 1987