

RCM 수립을 위해 발전설비의 고장확률을 고려한 확률론적 FMECA 평가 기법

주재명\*, 이승혁\*, 김진오\*, 이효상\*\*  
\*한양대학교 전기공학과, 한국전력거래소

Application of FMECA with Stochastic Approach to Reliability-Centered Maintenance of Electric Power Plants in Korean Power Systems

Jae-Myung Joo\*, Seung-Hyuk Lee\*, Jin-O Kim\*, Hyo-Sang Lee\*\*  
\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, \*\* KPX

**Abstract** - Preventive maintenance can avail the generation utilities to reduce cost and gain more profit in a competitive supply-side power market. So, it is necessary to perform reliability analysis on the systems in which reliability is essential. In this paper, RCM (Reliability -Centered Maintenance) analytical method is adopted using real historical failure data in Korean power plants. Therefore, the reliability -based Probability model for predicting the failures of components in the power plant is also established, and application to FMECA(Failure Mode Effects and Critical Analysis) consideration of failure probability, Based on the weighting ranking of generating equipments which status to be probability estimation by FMECA. The FMECA is an engineering analysis and a core activity performed by reliability engineers to review the effects of probable failure modes of generating equipments and assemblies of the power system on system performance

The results of this paper show that application of FMECA with stochastic approach to the preventive maintenance can efficiently avail decreasing the cost on maintenance and hence improve the total benefit.

1. 서 론

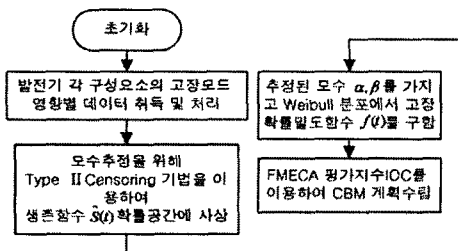
신뢰도 기반 유지보수(RCM : Reliability Centered Maintenance)는 각 설비 특성 파악과 운용 환경에 따른 설비의 중요도 및 과급효과 분석(FMEA : Failure Modes and Effects Analysis)을 통해 설비의 목표한 신뢰도를 유지하기 위한 가장 효율적이고 경제적인 유지보수계획을 수립한다. 또한, RCM은 완전히 새로운 유지보수 기법이 아니라 안전성과 경제성을 바탕으로 한 기존의 예방 유지보수(Preventive Maintenance) 기법인 TBM(Time-based Maintenance)과 CBM(Condition-based Maintenance)을 효과적으로 함께 고려하여 설비의 유지보수 기법을 제시하는 방법이다.

- TBM : 설비의 수명이나 상태에 관계없이 일정 시간 간격으로 유지보수를 하는 방법
- CBM : 설비 상태에 기반을 둔 진단기법

최적의 유지보수방법을 찾기 위해 설비의 수명과 심각도(Severity)를 고려한 새로운 지수를 이용한 확률론적 FMECA(Failure Mode Effects and Critical Analysis) 기법을 제안함으로써 CBM의 유지보수 기준을 제시하였다. 본 논문의 사례연구에서는 우리나라 전력계통 발전설비 중 비교적 수명이 짧은 복합화력 발전기의 고장 데이터를 취득하여 통계적 분석 방법인 Type II Censoring을 이용하여 Weibull 분포의 모수를 추정하여, 고장확률밀도함수를 구함으로써 고장확률을 계산하였다. 계산된 고장확률을 이용하여 FMECA의 새로운 지수 IOC(Index of Criticality)를 평가하여 신뢰도 기반 유지보수 계획을 수립할 수 있음을 보였다.

2. 통계적 분석 방법을 이용한 고장 확률밀도함수 구한

확률론적 FMECA 기법을 이용하여 발전기의 유지보수(교체나 수리) 순위를 선정하기 위해서는 발전기를 구성하고 있는 각 요소의 위험도와 노후도를 먼저 고려해야 한다.



<그림 1> 모수 추정 순서도

본 논문에서는 이러한 순위를 결정하는 과정에서 각 요소의 노후도와 고장률을 고려한 고장확률밀도함수를 이용하였다. 고장확률밀도함수의 구현은

여러 확률밀도함수를 구현할 수 있고 형태가 유연적인 Weibull 분포를 이용하였다. 또한 Weibull 분포는 지수분포와 달리 설비의 노후를 고려할 수 있다는 장점도 지니고 있다. 결국 FMECA 기법을 사용하여 신뢰도 기반의 유지보수계획을 수립하기 위해서는 발전기를 구성하고 있는 각 요소에 대한 Weibull 구현이 관건이 되며, 이를 계산하기 위하여 기존의 연구에서는 Gradient Decent Method 등 여러 방법을 논하였지만 본 논문에서는 Weibull 분포의 모수추정에 있어 간단하며, 상당히 정확한 통계적 분석방법인 Type II Censoring 기법을 사용하였다. 그림 1은 모수추정 과정의 순서도를 보여준다.

발전기의 고장과 관련된 과거 고장실적데이터는 부족하거나 불완전성을 갖는다. 따라서 불완전한 데이터 분석에 있어 다음과 같은 두가지 접근 방법이 있다.

- 1) 분석하려는 시점에 관측된 n개의 설비 모두 수명  $T_i (i=1,2,\dots,n)$ 을 다한 경우 ( $T_i < c$ ) : Left-censored
- 2) 분석하려는 시점에 관측된 n개의 설비 중에 수명을 다하거나 다하지 않은 설비 두 가지가 모두 존재하는 경우 ( $T_i > c$ ) : Right-censored

두 경우 중 1)과 같은 데이터 관측을 Type I Censoring 이라 하고, 2)와 같은 데이터를 Type II Censoring이라고 한다. Type II Censoring으로 분석되는 데이터는 수명을 다하지 않은 설비에 대한 확률을 고려해야 한다. 따라서  $T_i > c$ 에 대해서  $\epsilon_i$  라는 오차 확률변수를 고려하면  $T_i = c + \epsilon_i$ 라는 관계식이 유도 된다. 경험적 생존함수(Empirical Survivor Function :  $\hat{S}(t)$ )를 확률공간에 사상시켜 각 모수를 추정할 수 있다. 경험적 생존함수  $\hat{S}(t)$ 는 시간 t에 대하여 다음과 같은 시간적 흐름의  $t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_{(n)}$ 순서로 확률공간에 점을 찍을 수 있으며, 확률공간상에  $\hat{S}(t)$ 의 궤적을 살펴보면 다음 식 (1) 과 같다

$$\hat{S}(t) = 1 - \left(\frac{i-1}{n}\right) \tag{1}$$

$$\hat{S}(t_{(i)} + 0) = 1 - \left(\frac{i-1}{n}\right) - \frac{1}{n} \tag{2}$$

식 (2)에서  $\hat{S}(t_{(i)} + 0)$  는  $\hat{S}(t_{(i)})$ 의 다음 이동위치를 의미한다. 결국,  $t_i$ 에서  $\hat{S}(t)$ 의 평균은 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{2} \{ \hat{S}(t_{(i)}) + \hat{S}(t_{(i)} + 0) \} = 1 - \left(\frac{i-1}{n}\right) - \frac{1}{2n} = 1 - \left(\frac{i-1/2}{n}\right) \tag{3}$$

경험적 생존함수  $\hat{S}(t)$ 는 확률공간상에  $(t_{(i)}, 1-p_i)$ 의 위치로 나타낼 수 있으며,  $p_i$ 를 타점위치(Polting Position)이라고 한다. 식 (3)에 의해서  $p_i$ 는 식 (4)와 같이 표현 된다.

$$p_i = \frac{i-1/2}{n} \tag{4}$$

그러므로 경험적 생존함수  $\hat{S}$ 의 확률공간상 위치는 식 (5)와 같다.

$$(x, y) = \left( t_{(i)}, 1 - \frac{(i-1/2)}{n} \right) \tag{5}$$

Weibull 분포의 생존함수  $R(t) = \int_t^\infty f(t)dt = \exp[-(t/\alpha)^a]$ 의 양변에 log를 취하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\log\{-\log S(t)\} = \beta \log t - \beta \log \alpha \tag{6}$$

따라서 식 (5)와 (6)에 의해서 Weibull 분포의 생존함수는  $\log t_{(i)}$  와  $\log\{-\log[1-(i-1/2)/n]\}$ 으로 나타나는 선형함수가 된다. 이 선형함수의 기울기와 절편을 각각 a, b라고 하면 형태모수  $\beta = a$ 이고, 척도모수는  $\alpha = \exp(-b/a)$ 가 된다. 결국 추정된 형태 및 척도모수( $\alpha, \beta$ )를 구할 수 있다.

Weibull 분포의 확률밀도함수는 식 (7)과 같이 정의된다.

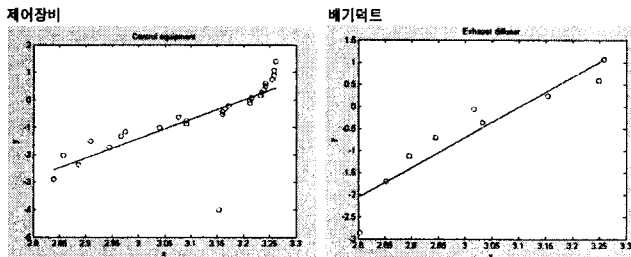
$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (7)$$

여기서,  $t \geq 0$ ,  $\beta > 0$  이고,  $\alpha > 0$  이다.

### 3. 사례연구 - Type II Censoring 기법을 이용한 복합화력 발전기의 FMECA 평가

사례연구에서는 우리나라 전력계통의 복합화력 발전설비의 과거 고장실적데이터(1977.12~2003.12)를 취득하여 부친 복합화력 발전기 #2의 각 구성요소별 고장데이터로 분리하였고, 각 요소의 서로 다른 설치년도를 고려하기 위하여 현존하는 복합화력 발전기 중 노후도가 가장 높은 발전기의 설치년도인 1977년을 기준으로 고장확률밀도함수를 Weibull 분포를 이용하여 계산하였다. 또한 복합화력 발전기는 16개의 구성요소로 분류하였다. 통계적 분석 방법인 Type II Censoring을 적용하기 위해서는 여러 복합화력 발전기 각 요소의 설치년도가 동일해야 한다. 따라서 위에 언급했듯이 1977년을 기준으로 모든 복합화력 발전기의 설치년도를 표준화 하였으며, 특정 발전기가 나중에 설치되었다면 시간적으로 설치년도가 1977년 이후로 이동된 고장확률밀도 특성을 지니게 된다.

예로 12개의 구성요소 중 비교적 고장이 많았던 제어장비와 배기덕트에 대해 통계적 분석 방법인 Type II Censoring을 이용하여 일차함수 회귀시킨 것을 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 복합화력 발전기 제어장비와 배기덕트 요소의 Weibull 분포 모수추정을 위한 일차함수로 회귀

표 1은 복합화력 발전기를 구성하는 각 요소의 Weibull 분포를 적용하기 위한 모수추정과 그 요소에 고장이 발생했을 경우 시스템에 미칠 수 있는 심각성을 지표화한 심각도(Severity) 계산 결과를 보여준다. 이 계산결과를 모든 요소의 설치년도를 1977년 12월로 하여 계산한 것이다.

〈표 1〉 복합화력 발전기 Component별 모수 추정과 Severity

No	Component	모수 추정		Severity
		$\alpha$ (척도)	$\beta$ (형상)	
1	제어장비	24.5225	7.0794	0.9
2	발전기 계전기	22.7889	7.4974	0.5
3	배기덕트	22.2576	6.8437	0.9
4	냉각수 펌프	19.8048	13.9616	0.8
5	가스터빈 블레이드	20.2619	8.0889	0.9
6	가스터빈 베어링	22.1878	5.1067	1.0
7	가스터빈 연소실	19.1665	10.5564	1.0
8	회전자 권선	20.6773	13.1291	1.0
9	발전기 차단기	22.2747	9.2576	0.5
10	압축기 블레이드	24.4462	9.8034	0.8
11	가스터빈 케이싱	18.3287	22.6170	0.4
12	발전기 변압기	18.9767	10.8651	0.7

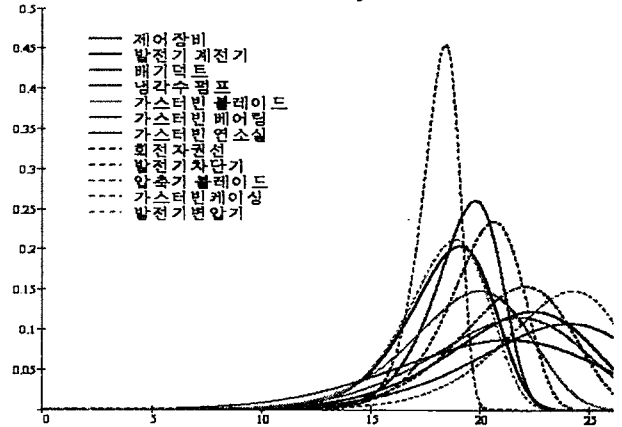
그림 3은 복합화력 발전기 12개 각 요소의 고장확률밀도함수를 관측시점(2003년 12월)까지 나타낸 것이다. 고장확률밀도함수가 12개 뿐인 것은 4가지 요소는 관측기간 동안 고장 건수가 1건으로 이는 통계적으로 유의하지 않기 때문에 고려하지 않았다. 표 2는 참고문헌 [5]를 참고하여 본 논문에서 제안한 FMECA 평가지를 보여준다. 예로 '가스터빈 연소실'이라는 요소에 대한 FMECA 평가를 나타내었다.

〈표 2〉 본 논문에서 제안한 FMECA 평가지

#### FMECA(Failure Mode Effects and Critical Analysis)

Item	Function	Failure	Effect	Severity	Occurrence	Failure Probability
가스터빈 연소실	가스로 인한 열에너지가 이용하여 가스터빈 구동	가스터빈 출력이 없어지면 발전기가 정출력을 내지 못함	발전력 상실	1.0	5	0.00000016
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

#### Failure Density Function



〈그림 3〉 복합화력 발전기 12가지 구성요소의 고장밀도함수

표 2를 이용하여 부친 #2 복합화력 발전기의 FMECA 평가를 위해 각 요소별 IOC(Index of Criticality)를 계산하면 표 3과 같다. 부친 #2 복합화력 발전기는 1993년 1월에 설치되었으며, 관측시점을 2003년 12월로 보았을 경우 11년간 운영된 설비가 되며, 표 1로 계산된 각 요소의 고장확률은 1977년 12월에 설치된 것으로 계산된 것이므로 부친 #2는 시간이동(Time-shift)가 발생하여 고장확률을 계산해야 한다. 또한 발전기마다 조금씩 다르기는 하나 전체적인 Overhaul은 기존의 TBM인 경우 5.5마다 한 번씩 실시하기 때문에 1993년 1월에 설치된 부친 #2는 1998년 6월에 한번 Overhaul을 실행한 후 2003년 12월을 관측시점으로 하여 계산하여야 한다. 관측시점 t에 대한 새로운 유지보수의 임제정도를 나타내는 지수인 IOC는 식 (8)처럼 정의할 수 있다.

$$IOC(t) = Failure\ Probability(t) \times Severity \quad (8)$$

〈표 3〉 부친 #2 복합화력 발전기의 고장확률 및 IOC 지수 계산결과

No	Component	Failure Probability	Severity	IOC
1	제어장비	0.00002266	0.9	0.000020394
2	발전기 계전기	0.00002088	0.5	0.00001044
3	배기덕트	0.00006278	0.9	0.000056502
4	냉각수 펌프	0.00000001	0.8	0.000000008
5	가스터빈 블레이드	0.00002308	0.9	0.000020772
6	가스터빈 베어링	0.00074337	1.0	0.00074337
7	가스터빈 연소실	0.00000016	1.0	0.00000016
8	회전자 권선	0.00000002	1.0	0.00000002
9	발전기 차단기	0.00000205	0.5	0.000001025
10	압축기 블레이드	0.00000038	0.8	0.000000304
11	가스터빈 케이싱	0	0.4	0
12	발전기 변압기	0.00000121	0.7	0.000000847

만일 관측시점에서 유지보수를 해야한다면 '가스터빈 베어링'을 제일 우선시 하여 유지보수 해야 할 것이다. 물론 IOC 지수값이 작다면 TBM 기반으로 꼭 5.5년에 한번씩 Over-haul 행하는 유지보수는 경제적인 관점으로 봤을 때 불필요한 것이 될 것이다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 최적의 유지보수를 위해 확률론적 FMECA 기법을 제안하기 위해 복합화력 발전기의 고장 데이터들을 취득하여 통계적 분석방법인 Type II Censoring을 이용 모수추정을 하여 Weibull 분포로 고장밀도함수를 구현하였다. 향후 연구방향으로는 경제성을 고려하여 신뢰도 기반 유지보수계획을 수립할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- 이성훈, 이승혁, 김진오, "통계적 분석방법을 이용한 복합화력 발전설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측", 전기학회논문지, 제 54A권, 제 10호, pp. 480-486, 2005, 10.
- Cheng Yun, T. S. Chung, C. W. Yu, C. Y. Chung, Zeng Ming, and Sun Xin, "Application of Reliability-Centered Stochastic Approach and FMECA to Conditional Maintenance of Electric Power Plants in China", IEEE International Conference on Electric DRPT, April 2004.
- R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluating of engineering system*, Plenum Press, 1992.
- M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, *Statistical analysis of reliability data*, Chapman and Hall, 1991.
- http://www.reliasoft.com/newsletter/3q2002/fmea.htm