2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

최소 비용을 위한 최적의 유지보수 주기 결정

김형준*, 신준석*, 김진오*, 김형철**
한양 대학교*, 한국 철도 기술 연구원**

Optimal Maintenance Interval Decision For Minimum Cost

Hyung-Jun Kim*, Jun Seok Shin*, Jin O Kim*, Hyung Chul Kim**
Hanyang University*, Korea Railroad Research Institute**

Abstract - A maintenance plan of power system equipment reduces failure rate caused by equipment's age. To prevent unexpected failure, the maintenance is performed periodically according to the interval time. The more expansive equipment's scale is, the more the maintenance without considering costs sustains a economical loss.
Hence, the maintenance's time and the cost must be considered when maintenance which is considering the reliability is implemented. In this paper, optimum maintenance interval is calculated by considering minimum maintenance cost of the equipment with the combined cycle units in Korea power systems.

1. 서 론

오늘날 산업사회는 현대 기술의 발달과 고도화됨에 따라 전력 계통 설비의 규모가 점점 성장되어지고 있으며 복잡해지고 있다. 점점 거대화 되어지는 전력 계통에서 설비의 노화나 예기치 못한 설비 고장으로 발생되는 파급 효과는 설비뿐만 아니라 더 나아가 전력 계통의 신뢰도 저하에 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 전력 계통 설비에 대한 유지 보수 계획의 중요성과 필요성에 대한 인식이 점점 대두되고 있으며 설비에 적용 될 유지보수 시간도 함께 고려되어지고 있다. 또한 각 설비에 대한 유지보수 비용이 점차 큰 비중을 차지하기 때문에 각 설비의 특성을 무시한 임의적인 시간에서의 무조건적인 유지보수는 매우 큰 경제적 낭비를 초래하게 된다. 따라서 설비의 수명도 고려하면서 경제적인 측면을 고려하여 최적의 유지보수 계획을 수립하기 위하여 신뢰도라는 이론을 접목한 유지보수 계획이 신뢰도 기반 유지보수(RCM: Reliability Centered Maintenance) 계획이다. 결국, 유지보수 계획은 각 설비의 신뢰도를 고려하여 시간과 비용을 함께 고려해야 경제적인 유지보수를 할 수 있다.

본 논문에서는 각 전력 계통 설비에 대한 최소한의 비용을 고려한 최적의 유지보수 주기를 결정하기 위하여 비용 함수 모델을 적용하게 되었다. 각 전력 계통 설비의 신뢰도 함수(Survival Function),$R(t)$,는 시간에 따라 고장률이 증가하는 Weibull 분포를 이용하였고, 각 설비의 특성을 나타내는 Weibull 분포의 척도 모수(α)와 형태모수(β) 그리고 설비의 운영시점($t=0$)에서 고장 시점(t_p)까지 설비에 소요되는 1회 PM, CM비용을 가정하였다.

2. 비용 함수 모델

유지 보수 계획은 설비 상태에 따라 크게 두 가지 형태로 구분된다. 설비의 고장을 미리 예방하고자 행하는 예방 유지 보수(PM: Preventive Maintenance)와 고장이 발생했을 경우 바로 교체 및 보수를 행하는 고장정비(CM: Corrective Maintenance)이다. 따라서 전력 계통 설비는 일정한 시간(T)에 따라 PM을 실행한다고 가정하면, PM의 실행 시점은 $1T, 2T, 3T, \cdots NT$가 된다. PM 실행 후, 임의 시점(t_p)에서 예치기 못한 영향으로 설비가 고장이 발생했을 경우, 또는 PM을 실행하기 어려운 경우, 바로 CM을 실행 하게 된다. PM과 CM을 실시한 후, 그 설비 상태에 대한 신뢰도 지수 R(t)는 거의 새것과 같은 좋은 상태 (as good as now)가 된다고 가정했다.

설비의 유지보수를 실행하게 될 때 유지보수의 주기뿐만 아니라 유지보수 비용도 함께 고려해야 한다. 만일 각 설비의 신뢰도를 고려한 유지보수 주기와 유지보수 비용을 고려하지 않고 임의적으로 유지보수를 실행하게 된다면 경제적인 면에서나 시간적인 면에서 매우 큰 손실을 얻게 될 것이다. 따라서 각 설비에 대한 유지보수는 최소한의 비용으로 최적의 유지보수 주기를 결정하기 위하여 PM 주기를 T로 나타낸 단위 시간당 목적 비용 함수($F(T)$)를 식(1) 같이 제안했다. 최적의 PM 주기를 T^*로 나타내면 단위 시간당 최적의 주기에 대한 최소한의 목적 비용함수는 $F(T^*)$이다[1,2].

$$F(T) = \frac{E[C(t_p)]}{E[t_p]} \tag{1}$$

여기서,

$E[C(t_p)]$: 설비의 운영시점($t=0$)에서 고장시점(t_p)까지의 총 기대비용
$E[(t_p)]$: 설비의 운영시점($t=0$)에서 고장시점(t_p)까지의 기대 시간

3. 신뢰도 함수

PM을 N번째 실행한 시간 NT와 (N+1)번째 실행한 시간 (N+1)T 사이에 고장시간 t_p가 존재하면 설비의 신뢰도 함수$R_T(t_p)$는 식 (2)과 같다.

$$R_T(t_p) = R(T)^N R(t_p - NT) \tag{2}$$

$$NT \le t_p < (N+1)T, N = 1, 2, \cdots$$

여기서, N: 실행된 PM 횟수

식 (2)를 이용하여 임의의 고장 시간(t_p)의 기대치는 식(3)과 같다.

$$E(t_p) = \int_0^\infty R_T(t_p)dt = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R(T)^N R(t_p - NT)dt \tag{3}$$

여기서,$Q(t)$: 시간t 에서 설비가 운영되지 않을 확률; $Q(t) = 1 - R(t)$

또한, 식 (3)을 정리하면 식 (4)과 같다.

$$E(t_p) = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+1)T} R(T)^N R(t_p - NT)dt = \int_0^T R(t)dt \tag{4}$$
$$+ \int_T^{2T} R(T) \cdot R(t-T)dt + \int_{2T}^{3T} R(T)^2 \cdot R(t-2T)dt + \cdots$$

식 (4)에서 식 (5)로 정리 할 수 있다.

$$\int_0^T R(t)dt = \int_T^{2T} R(t-T)dt = \int_{2T}^{3T} R(t-2T)dt = \cdots \tag{5}$$

따라서 식 (5)를 이용한 식 (4)는 식 (6)과 같다.

$$E(t_p) = (1 + R(T) + R(T)^2 + \cdots) \cdot \int_0^T R(t)dt \tag{6}$$

식 (6)의 $(1 + R(T) + R(T)^2 + \cdots)$은 Taylor 급수정리에 의해 식 (7)과 같이 정리된다.

$$(1 + R(T) + R(T)^2 + \cdots) = \frac{1}{1 - R(T)} = \frac{1}{Q(T)} \tag{7}$$

결국, 식(3)에서의 기대치는 식(8)과 같다.

$$E(t_p)=\sum_{N=0}^{\infty}\int_{NT}^{(N+1)T} R(T)^N R(t_p-NT)dt=\frac{\int_0^T R(t_p)dt}{Q(T)} \tag{8}$$

4. 총 유지보수 비용

설비의 운영 시작 시점($t=0$)에서부터 고장 시점(t_p)까지 설비운영에 필요한 비용 즉, 총 기대비용 $E[C(t_p)]$는 식(9)과 같다.

$$E[C(t_p)]=C_n\cdot\int_0^T R(t_p)dt+C_r \tag{9}$$

여기서, $C_n,\ C_r$: 1회 PM , CM 실행에 필요한 비용[원]

결국, 단위시간당 목적 비용함수 $F(T)$는 식(8)과 식(9)을 이용하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$F(T)=\frac{E[C(t_p)]}{E[t_p]}=\frac{C_n\cdot\int_0^T R(t_p)dt+C_r}{\int_0^T R(t_p)dt} \tag{10}$$

5. 사례연구

시스템의 RCM평가를 위해서는 시스템 및 하위시스템의 기능을 확인하고, 시스템 및 하위 시스템의 구분 수준을 결정하여 기능별로 블록화하는 과정이 필요하다, 따라서 본 논문에서는 우리나라 복합 화력 발전 설비의 블록화 된 하위 시스템 즉, 가스터빈, 보일러, 전기 설비 그리고 제어 계측 및 전산설비의 데이터를 가정하여 단위 시간당 목적비용 함수, $F(T)$,에 적용 하였다.

각 설비의 가정화된 고장 데이터를 시간에 따라 고장률이 증가하는 Weibull 분포의 신뢰도 함수 $R(t)$에 적용시켰다. Weibull 분포의 신뢰도 함수, $R(t)$,는 식 (11)과 같다[3].

$$R(t)=e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{11}$$

여기서 α:Weibull 분포의 척도 모수(Scale Parameter)
β:Weibull 분포의 형태 모수(Shape Parameter)

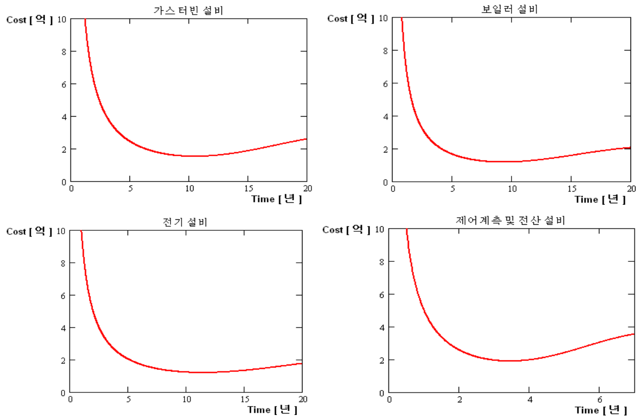
각 설비의 특징과 특성 그리고 고장 형태에 따라 소요되는 PM과 CM의 비용은 각각 다르다. PM의 횟수는 CM의 횟수보다 많지만 만일, 고장이 난 경우, 설비에 소요되는 CM의 비용은 PM 비용보다 더 많은 비용이 소요된다. 일반적으로 각 설비에 소요되는 PM, CM비용은 각 특성에 따라 임의적으로 가정한다. 본 논문에서는 각 설비에 소요되는 PM, CM 비용과 척도 모수와 형태모수를 표 1과 같이 가정하였다[4].

<표 1> 각 설비에 대한 PM, CM 비용과 척도 모수 및 형태 모수

	1회 PM 비용 (c_n) [원]	1회 CM 비용 (c_r) [원]	척도모수 (α)	형태모수 (β)
가스 터빈	12억	48억	17.8616	4.2370
보일러	8억	32억	16.1531	3.9001
전기 설비	10억	40억	19.7681	3.9205
제어계측 및 전산설비	5억	20억	5.7943	4.4652

각 하위 시스템에 대한 특성을 나타낸 표 1과 Weibull 분포의 신뢰도 함수 식(11)을 식(10)에 적용함으로써 각 전력 시스템 설비에 따른 목적 비용함수 그래프를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 각 x축은 설비의 PM 실행 주기이며, 20년까지 변화해가면서 y축에 PM 주기에 따른 총 기대비용을 나타내었다. PM실행주기가 짧을수록 PM실행횟수가 많아지므로 그에 따라 PM비용이 증가하게 되지만 CM실행 횟수는 적어지므로 CM비용은 적어진다. 이와 반대로 PM실행 주기가 길어질수록 PM실행 횟수는 적어지므로 PM비용은 감소하나 CM실행횟수가 늘어나므로 CM 비용이 증가한다. 따라서 비용을 고려한 최적의 PM주기를 결정하기 위해서는 PM비용과 CM비용을 모두 고려한 총 기대비용이 최소화되는 주기를 결정해야한다. 그림1에서 보는 바와 같이 총 기대비용을 최소화하는 최적 주기(T^*)를 표 2에 나타내었다.

우리나라 복합 화력 발전 설비에 적용되어지는 기존의 A급 유지보수 주기는 표 2에서와 같이 48,000시간으로 약 5.5[년]마다 PM을 실행하고 있다. A급 유지보수 주기와 본 논문에서 제안한 PM 주기를 비교 분석해 본 결과 본 논문에서 제안된 최적 PM 주기는 기존의 PM주기 보다 유지보수 주기를 길게 가짐으로써 설비를 더 효율적으로 이용할 수 있고 유지보수에 소요되는 비용을 경제적으로 절약할 수 있다.



<그림 1>각 설비의 목적 비용 함수, $F(T)$, 곡선

<표 2> 각 설비의 기존 PM주기와 최적 PM주기와 최소 비용

	기존 PM주기 [년]	PM주기(T^*) [년]	최적 비용($F(T^*)$) [원/년]
가스 터빈	5.48	10.41	1.5151억
보일러	5.48	9.24	1.17억
전기 설비	5.48	11.32	1.1915억
제어계측 및 전산설비	5.48	3.44	1.8913억

3. 결 론

본 논문에서는 복합화력 발전 설비의 최소 비용을 고려한 최적의 예방 유지 보수(PM)주기를 찾기 위하여 Weibull 분포를 이용한 각 목적 비용 함수에 적용하였다. 현재 이루어지는 복합 화력 발전 설비의 PM 계획은 설비의 특성을 고려하지 않은 일정한 주기 약 5.5년에 막대한 비용을 들여가며 과도하게 유지보수가 이루어지고 있다. 설비 성능의 중요성을 위해 높은 안전성과 신뢰성을 바탕으로 한 PM도 중요하지만 이것은 엄청난 경제적 손실이다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 PM 주기보다 수명을 더 고려하여 PM 주기를 더 연장 할 수 있다. 또한 기존의 PM비용 보다 더 경감할 수 있어 기존의 PM방법보다 더 경제적이다. 따라서 본 논문에서 제안한 유지보수 방법을 이용하면 경제적인 측면을 고려한 최적의 PM 계획을 수립할 수 있다.

단, 본 논문에서는 완벽한 유지보수를 가정한 PM을 고려하였지만, 때로는 PM이 환경적인 영향으로 생기는 오류, PM 실행 시의 작업오류 또는 드러나지 않는 고장률 등 여러 가지 원인으로 완벽하지 못한 유지보수(Imperfect Maintenance)가 될 수 있다. 향후 연구방향으로 완벽하지 못한 유지보수를 고려하여 신뢰도 기반 유지보수 계획을 제안할 것이다.

감사의 글

본 논문의 연구는 '한국철도기술연구원'에서 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] F.G.Badia.M.D.Berrade,Clemente A. Campos, 'Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures', Reliability Engineering and System Safety,78,157-163,2002

[2] Ross S.'Stochastic precesses' ,2nd ed, New York, Wiley. 1996.

[3] Roy Billinton, Ronald N. Allan,'Reliability Evaluation of Engineering Systems',2nd ed. Plenum Press,1992.

[4] 이성훈, 이승혁, 김진오,'통계적 분석 방법을 이용한 복합화력 발전 설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측', 전기 학회 논문지, 제 54 권,제 10호,pp. 480-486,2005,10.