2007년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집 (2007. 11. 2 ~ 3)

불안전한 유지보수를 고려한 전력 설비의 예방 정비 계획

변융태*, 김형준*, 김진오*, 김형철**
한양대학교*, 한국 철도 기술 연구원**

Preventive Maintenance Plan of Power System Unit Considering Imperfect Maintenance

Yoong Tae Byeon*, Hyung-Jun Kim*, Jin O Kim*, Hyung Chul Kim**
Hanyang University*, Korea Railroad Research Institute**

Abstract - Recently, the research of PM (Preventive Maintenance) method on the RCM(Reliability-Centered Maintenance) of the system equipment is being actively advanced for a few years. The state of the power equipment is maintained like the states of the between 'as good as new ones' and 'as bad as old ones' by imperfect Maintenance that implies the life decrease of the equipment by frequent breakdown, the error of maintenance process, and so on. So, the Maintenance method considering the real case has to reflect Imperfect maintenance than perfect maintenance.

This paper suggests the Preventive Maintenance me thod by using Quasi - Renewal Theory for the gas t urbine equipment as deliberating the imperfect mainten ance for the real cases.

1. 서 론

오늘날 산업사회는 현대 기술의 발달과 고도화됨에 따라 전력 계통 설비의 규모가 점점 성장하고 있으며, 복잡해지고 있다. 설비의 노화나 예기치 못한 설비 고장으로 발생되는 파급효과는 설비뿐만 아니라 더 나아가 전력 계통의 신뢰도 저하에 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 각 설비에 적용 될 필요한 유지보수의 종류와 시간 및 비용이 점차 큰 비중을 차지하기 때문에 각 설비의 특성과 수명을 고려한다. 최적의 유지보수 계획을 수립하기 위하여 신뢰도라는 이론을 접목한 유지보수 계획이 신뢰도 기반 유지보수(RCM: Reliability Centered Maintenance) 계획이다. 최근 몇 년 동안 예방 유지보수(Preventive Maintenance)에 관하여 많은 학문적 연구 방안에 대해 관심을 쏟은 결과, 대다수의 유지보수 방법에 관한 정의는 완전한 유지보수(Perfect Maintenance)라는 가정을 두고 있다. 하지만 현실성과 한계성을 고려한다면 완전한 유지보수 후, 시스템 설비의 상태는 예상한 것과는 달리 '새것과 같은 상태' 가 되지 않는다. 즉, 현실적인 상황을 고려한다면 유지보수는 '불안전한 유지보수 (Imperfect Maintenance)' 가정이 완벽한 유지보수 가정보다 더 타당하다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 신뢰도 기반 유지보수를 바탕으로 불안전한 유지보수를 가정하여 가스터빈 설비에 대하여 Quasi - renewal theory를 이용하였다. Age-dependent Preventive Maintenance 과 Block Preventive Maintenance의 비용 함수에 적용하여 가스 터빈의 불안전한 유지보수 주기와 주기에 대한 비용을 결정하였다.

2. 예방 유지보수 개요

2.1 Age-dependent PM 방법

APM은 시스템 설비의 수명(Life time)을 고려한 유지보수 방법이다. 설비의 상태가 고장 발생하기 직전까지 악화되거나 설비의 노화로 인하여 수명이 다했을 경우 고장이 발생하게 된다. 수명에 관하여 고장이 처음 발생한 시점을 시스템 설비 고장(failure) 시점 t_0라고 정의한다. 수명을 고려한 고장 시점 t_0만큼 일정하게 유지보수 주기 T로 설비를 유지보수를 한다.

2.2 Block Preventive Maintenance(BPM) 방법

BPM은 시스템 설비를 미리 정해진 일정한 유지보수 주기 T를 기준으로 $KT(T, 2T, 3T, \cdots)$시점 마다 주기적으로 유지보수를 한다. 따라서 BPM을 주기적 유지보수(PPM: Periodic PM) 또는 시간 기준 유지보수(TBM: Time based maintenance)라고 한다.

2.3 완벽한 유지보수(Perfect Maintenance)

완벽한 유지보수(Perfect Maintenance)란 예방 유지보수 과정 및 유지보수의 결과에 따른 시스템 설비의 상태를 말한다. 고장이 시점t_0에서 발생하였을 때, 유지보수를 실행하게 된다. 유지보수 후, 시스템 설비의 상태는 처음과 같은 상태, 즉 'As good As new ones'와 같은 상태가 된다.

2.4 불완전한 유지보수(Imperfect Maintenance)

현실성과 유지보수의 한계성을 고려한다면 그 시스템은 완전히 새것과 같은 상태가 되지 않을 수도 있다. 즉, 불완전한 유지보수 후, 시스템의 상태는 '새것과 같은 상태'보다는 완전하지 못한 상태가 되며 최소한의 유지보수 (Minimal Maintenance)로 유지보수 되어 시스템 상태가 좋아지지 않은 'As bad as old ones' 과 같은 상태로 유지보수가 될 수 있다. 따라서 시스템의 상태는 새로운 제품(Brand new ones)보다는 못하지만 완전히 고장 난 것보다는 좀 더 나은 상태가 된다.

3. 불완전한 유지보수 분석

3.1 Renewal Process

완전한 유지보수를 가정한 시스템은 연속적 시간(Sequence Time)에서 수리시간이 매우 짧아 고려되지 않는다고 가정 할 때 고장 난 시점이 $S_1, S_2, S_3, \cdots$가정하게 되면 각각의 시간 간격은 $T_1, T_2, T_3, \cdots$이 되어 각 시간간격에서의 시스템 상태는 $X_1, X_2, X_3, \cdots$가 된다. 즉 X_i은$(N-1)$번째와N 번째 사건 사이의 동작 상태(Operation state)이며, N_i를 Counting Process 또는 Renewal process라고 한다.

3.2 Quasi-renewal process

불안전한 유지보수에서의 시스템 상태는 시스템 고장의 영향, 유지보수 수행 중에 생긴 손상 및 보이지 않는 환경적인 영향으로 시스템 설비의 수명이 차츰 감소하게

된다. 즉 $S_1, S_2, S_3, \cdots$ 시점에서의 시스템 상태는 일정한 상수인 시스템 동작 감퇴 계수(System Operating deterioration parameter) u만큼 씩 감소하여 식 (1)과 같이 나타나게 된다.

$$X_1 = Z_1, X_2 = uZ_2, X_3 = u^2 Z_3, \cdots u > 0 : \text{상수} \quad (1)$$

여기서, X_i : 설비의각상태
u : 동작감퇴계수

식(1)과 같이 감소 계수 u에 대한 Renewal Process를 Quasi-Renewal Process $Q(t)$라고 한다. 시스템의 상태 누적 분포 함수 (Cumulative Distributed Function: CDF)와 확률 밀도 함수(probability density function: pdf)는 식 (2), (3)와 같다.

$$F_{X_n}(t) = F_{X_1}(u^{-(n-1)}t) \quad (2)$$

$$f_{X_n}(t) = \frac{f_{X_1}(u^{-(n-1)}t)}{u^{(n-1)}} \quad (3)$$

여기서, n : 시스템 상태의 횟수

2.3 Quasi-renewal function

식(1)의 각 상태 X_i의합은 식 (4)와 같다.

$$\Lambda_n = \sum_{i=1}^{n} X_i \quad (4)$$

여기서, Λ_n : $i=1$에서 $i=n$ 까지 각 X상태의 합

$Q(t)$와 기대횟수 $E[N(t)]$는 같으며 각 함수의 합은 유지보수 횟수인 convolution의 합이며, 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} Q(t) = E[N(t)] &= \sum_{n=0}^{\infty} n Pr[N(t) = n] \quad (5) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n(\Pr[N(t) \ge n] - \Pr[N(t) \ge n+1]) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n(\Pr[X_1 + \cdots + X_n \le t] - \Pr[X_1 + \cdots + X_{n+1} \le t]) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n(F_{\Lambda}^{(n)}(t) - F_{\Lambda}^{(n+1)}(t)) = \sum_{n=1}^{\infty} F_{\Lambda}^{(n)}(t) \end{aligned}$$

여기서, $F_{\Lambda}^{(n)}(t)$ 는 $F_{\Lambda}(t)$ 의 convolution 횟수

시간 영역에서의 convolution은 산정하기 난해하다. 따라서 Laplace 변환하는 것이 더 효율적이다. 식(5)를 라플라스 변환하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} Q^*(s) = L\{Q(t)\} &= L\left\{\sum_{n=1}^{\infty} F_{\Lambda}^{(n)}\right\} \quad (6) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{s} f_{X_1}^*(s) f_{X_1}^*(us) \cdots f_{X_1}^*(u^{n-1}s) \\ &= \frac{1}{s}[f_{X_1}^*(s) + \sum_{n=2}^{\infty} f_{X_1}^*(s) f_{X_2}^*(s) \cdots f_{X_n}^*(s)] \\ &= \frac{1}{s}[f_{X_1}^*(s) + f_{X_1}^*(s) \sum_{n=2}^{\infty} f_{X_2}^*(s) f_{X_3}^*(s) \cdots f_{X_n}^*(s)] \end{aligned}$$

3.5 Point Availability

Point availability는 시스템이 시간 t지점에서 동작할 확률을 말한다. Quasi-renewal function의 convolution 수를 계산하기 위해 Point Availability를 이용한다. 만일 유지보수 횟수 인 convolution의 수가 $(n+1)-n$의 오차 값이 0.001보다 작거나 같다면 그 지점은 가용 율이 비슷하게 되기 때문에 그 지점은 고장 난 지점이라고 본다. point Availability는 식 (7)과 같으며 라플라스 변환은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} A(t) &= \overline{F_{X_1}}(t) + \int_0^t \overline{F_{X_2}}(t-u) f_{\Lambda_1}(u)du + \cdots \quad (7) \\ &\quad \int_0^t \overline{F_{X_{n+1}}}(t-u) f_{\Lambda_n}(u)du \\ &= \overline{F_{X_1}}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \overline{F_{X_{n+1}}}(t-u) f_{\Lambda_n}(u)du \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A^*(s) &= \frac{1}{s}[(1-f_{X_1}^*(s)) + \sum_{n=1}^{\infty}(1-f_{X_{n+1}}^*(s)) f_{\Lambda_n}^*(s)] \quad (8) \\ &= \frac{1}{s}[(1-\frac{\lambda}{\lambda+s}) + \sum_{n=1}^{\infty}(1-\frac{\lambda}{\lambda+u^n s})\prod_{i=1}^{n}(\frac{\lambda}{\lambda+u^{i-1}s})] \end{aligned}$$

여기서,
$\lambda = \frac{1}{\alpha}$: Gamma 분포 함수의 척도모수($\alpha$:Scale parameter)의 역수
β: Gamma 분포 함수의 형태모수(Shape parameter)

라플라스 변환과 point Availability를 이용하여 유지보수 횟수 즉 convolution 횟수를 구할 수 있다.

4. 비용함수 모델

4.1 BPM 비용함수 모델

BPM은 매 정해진 유지보수 주기 T마다 유지보수를 실행하게 되므로 PM을 실시하게 된다. 만일, 갑작스런 원인으로 계획된 설비 교체 주기 전에 고장이 발생하면 CM을 실시하여 교체하게 된다. 비용함수 모델은 식 (9)와 같다.

$$F_{BPM}(t_p) = \frac{E[C(t_p)]}{E[t_p]} = \frac{C_{PM} + C_{CM} Q(t_p)}{t_p} \quad (9)$$

여기서,
$E[C(t_p)]$: 설비의 운영시점$(t=0)$에서 고장 시점(t_p)까지의 총 기대비용
$E[(t_p)]$: 설비의 운영시점$(t=0)$에서 고장 시점(t_p)까지의 기대 시간
C_{PM} :1회 PM 실행에 필요한 비용[원]
C_{CM} :1회 CM 실행에 필요한 비용[원]
$Q(t_p)$:0에서 t_p시점 까지 Quasi - renewal 함수

4.2 APM 비용함수 모델

APM은 시스템의 설비 유지보수 목적으로 수명 t_p에 교체되거나, 계획된 설비 교체 주기 전에 고장이 났을 시 교체된다. APM의 단위 시간당 기대 유지보수 비용은 식 (10) 와 같다.

$$F_{APM}(t_p) = \frac{\text{단위주기당총기대비용}}{\text{기대주기 길이}} \quad (10)$$

따라서, 식(10)는 식(11)과 같다.

$$F_{APM}(t_p) = \frac{C_{PM}R(t_p) + C_{CM}(1 - R(t_p))}{\int_0^{t_p} R(t_p)dt} \quad (11)$$

여기서, $R(t_p)$: t_p시점에 시스템이 살아있을 확률
$[1 - R(t_p)]$: t_p시점에 시스템이 죽어있을 확률

식(11)에서 고장 밀도 함수 $f(t)$와 신뢰도 함수 $R(t)$는 동작 감소 계수(u)에 따라 식(12) 와 식(13)과 같다.

$$f(t) = L^{-1}(f^*_{X_n}(s)) = L^{-1}(f^*_{X_1}(u^{n-1}s)) \quad (12)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt \quad (13)$$

APM에 대한 비용 함수는 불안전 유지보수에 대한 컨볼루션 횟수 n값을 고장밀도 함수에 적용하고 신뢰도 함수를 이용하여 목적 비용 함수 모델에 이용한다.

5. 사례연구

우리나라 전력계통의 복합화력 발전 설비 중의 하나인 가스터빈 데이터를 가정하여 Quasi-renewal function을 적용한 불안전한 유지보수 방법을 이용하여 APM과 BPM의 두 경우에서의 비용 함수 모델에 적용하였다.

5.1 Gamma 분포 함수

가스 터빈 시스템의 가정화된 데이터를 시간에 따라 고장률이 증가하는 Gamma 분포의 신뢰도 함수$R(t)$에 적용하였다. Gamma 분포의 고장 밀도 함수(Failure density function)와 신뢰도 함수(Reliability function)를 식 (14),(15)에 나타내었다.

$$f(t) = \frac{t^{\beta-1}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} exp[-\frac{t}{\alpha}] \quad \Gamma(\beta) = (\beta-1)! \quad (14)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt \quad (15)$$

불안전한 유지보수 경우,Gamma 분포의 고장 밀도 함수와 신뢰도 함수를 라플라스 변화하면 식(16),(17)와 같다.

$$f_{X_n}(t) = L^{-1}(f^*_{X_1}(u^{n-1}s) = L^{-1}\left(\frac{\lambda}{\lambda + u^{n-1}s}\right)^\beta \quad (16)$$

$$R_{X_n}(t) = \int_t^\infty f_{X_n}(t)dt \quad (17)$$

가스터빈의 척도, 형태 모수 및 동작 감퇴 계수는 표1와 같이 가정하였다.

<표 1> 가스터빈의 척도,형태 모수 및 동작 감퇴 계수

	척도 모수(α)	형태 모수(β)	동작 감퇴 계수(u)
가스터빈	1.182	14	0.4

5.2 Point availability를 이용한 Convolution 횟수

식(7)를 이용하여 가스터빈의 오차가 0.001 보다 작거나 같은 값 일 때 convolution 값을 정한다. 표2에서 n이 2가 될 때 오차가 0.001보다 작거나 같게 된다. 따라서 유지보수 횟수는 2가 된다.

<표 2> 가스터빈의 convolution 산정

n		1	2	3
T=11	A_n	0.92908	0.92921	0.92921
	$A_{n+1} - A_n$	0.00013	0	
T=12	A_n	0.88006	0.88041	0.88042
	$A_{n+1} - A_n$	0.00035	0.00001	
T=13	A_n	0.81543	0.81628	0.81631
	$A_{n+1} - A_n$	0.00085	0.00003	

5.3 BPM과 APM의 목적 비용함수

불안전 유지보수에서 가스터빈의 PM의 가격은 5천만원, CM의 가격은 5억으로 가정하였다. CM의 가격은 고장 난후 시스템을 정비하는 고장 정비이기 때문에 PM의 가격보다 더 높게 측정하였다. BPM은 식(9), APM은 식(11)을 이용하여 그림1에 나타내었다. BPM과 APM의 최적 주기와 최적주기에 대한 비용을 표 3에 나타내었다.

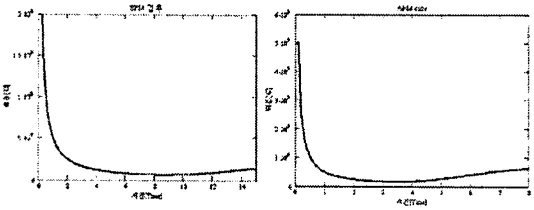

그림 1가스터빈의 BPM과 APM의 목적비용함수 곡선

<표 3> 가스터빈의 최적 BPM과 APM의 PM주기와 최소 비용

가스 터빈	1회 PM비용 [억원]	1회 CM비용 [억원]	최적 주기 [년]	최적 비용 [원]
BPM	0.5	5	8.7	6,660,000
APM	0.5	5	3.4	16,800,000

6. 결 론

현재 많은 전력 시스템에서 유지보수 방법을 사용하고 있으나 완벽한 유지보수를 가정 한 유지보수 방법이라면, 이것은 현실성과 신뢰성을 고려하지 않은 유지보수 방법이다. 고장 또는 불안전한 유지보수의 영향으로 인하여 시스템의 수명이 점차 감소하게 됨에 따라 동작 시간도 점차 줄어들게 되어 유지보수 시간, 비용 등 매우 큰 손실을 가져오게 된다.

본 논문에서는 가스터빈에 대하여 불안전한 유지보수를 가정한 BPM과 APM에서 Quasi-renewal Theory를 이용하였고, 각 유지보수에 따른 비용함수의 최적 주기를 찾았고, 그 주기에 따른 비용을 찾게 되었다. 따라서 경제적인 측면을 고려한 최적의 PM 계획을 수립할 수 있었다. 이는 향후 불완전한 유지보수 계획에 아주 유용한 방법이 될 것으로 사료 된다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Ross, Stochastic Processes, 2nded, New York, wiley, 1996

[2] M. Rausand, A. Hoyland, System Reliability Theory, Willey-Interscience,2004

[3] I. Jon Rehmert, "Availability Analysis for the Quasi-renewal process" Virginia Polytechnic Institute and State University,2000.

[4] S. Yang "Quasi-renewal Approach to Spares Provisioning for Deteriorating Systems under Imperfect Maintenance Reliability Centered Maintenance," IEEE, pp.577~585,2004.