

# 비용을 고려한 발전설비의 예방유지보수 계획 수립

( Establishment of Preventive Maintenance Planning for Generation Facility Considering Cost)

김형준\* · 신준석 · 김진오 · 김형철

(Hung-Jun Kim · Jun Seok Shin · Jin O Kim · Hyung Chul Kim)

## Abstract

Traditional maintenance planning is based on a constant maintenance interval for equipment life. In order to consider economic aspect for time based preventive maintenance, preventive maintenance is desirable to be scheduled by RCM(Reliability-Centered Maintenance) evaluation. The main objective of RCM is to reduce the maintenance cost, by focusing on the most important functions of the system and avoiding or removing maintenance actions that are not strictly necessary. So, Markov state model is utilized considering stochastic state in RCM. In this paper, a Markov state model which can be used for scheduling and optimization of maintenance is presented. The deterioration process of system condition is modeled by the stepwise Markov model in detail. Also, because the system is not continuously monitored, the inspection is considered. In case study, simulation results about RCM will be shown using the real historical data of combustion turbine generating unit in Korean power systems.

## 1. 서론

전력시스템은 전력을 사용하고 있는 수요자들에게 안정적인 전력공급이 중요하다. 안정적인 전력 공급을 위해서는 여러 중요한 조건들이 있지만 그 중에서 전력시스템을 구성하고 있는 설비들이 안정적인 전력공급을 할 수 있는 상태를 유지시키기 위한 예방 유지보수 계획 수립도 중요하다.

현재 우리나라에서 전력설비에 적용하고 있는 기존의 일정한 시간간격으로 실행하는 시간기준 예방 유지보수 계획(Time-Based Preventive Maintenance)은 일괄적인 유지보수 주기를 설비에 적용한다. 그러나 이러한 예방유지보수 계획은 설비의 수명을 고려하지 않고 일괄적인 주기를 설비에 적용하므로 유지보수에 필요한 비용이 과다하게 소요되게 된다. 따라서 설비의 수명도 고려하면서 경제적인 측면을 고려하여 최적의 유지보수 계획을 수립하기 위하여 신뢰도라는 확률적인 이론을 접목한 유지보수 계획이 바로 신뢰도 기반 유지보수(RCM : Reliability Centered Maintenance) 계획이다.

RCM 계획 수립에 있어서 시스템이 고장을 일으키기 전에 예방유지보수(PM : Preventive Maintenance)를 실행하는 시기 결정과 시스템의 상태를 계속적으로 모니터링 할 수 없는 상황이라면 시스템의 상태를 알기 위한 검사(Inspection)의 주기 결정이 중요하다. 또한 PM 주기와 검사 주기를 짧게 가져갈수록 시스템이 고장 상태로 갈 확률을 줄일 수 있으나 그만큼 시스템을 운영하는데 비용이 증가 하게 된다. 따라서 PM과 검사 주기 결정에 비용 또한 고려를 해야 한다.

본 논문에서는 RCM 계획 수립 방법에서 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov State Model을 이용하여 PM 계획을 수립하는 방법을 제안하였다. Markov State Model을 적용하기 위해서는 시스템의 성능이 저하되는 각각의 상태를 나누는 확률적 기준이 필요하다. 따라서 노르웨이의 EBI(Norwegian Electricity Industry Association)에서 시스템의 상태를 나누는 기준을 참고하였다 [2]. 기준에 따라 나누어진 각 상태를 감마분포(Gamma Distribution)와 지수분포(Exponential Distribution)로 정의하고 각각의 상태사이에 존재하는 천이율(Transition Rate)

을 계산을 하였다. 또한 시스템을 운영하는데 소요되는 비용은 각 상태의 정상상태 확률(Steady State Probability)과 Visit Frequency를 이용하여 계산하여 시스템을 운영에 필요한 비용을 최소화하는 유지보수 계획수립 방법을 제안하였다 [3, 4]. 사례연구에서 우리나라 복합화력 발전설비 1기에 대하여 본 논문에서 제안한 Markov State Model을 적용하였다.

## 2. 정상상태 확률과 Visit Frequency

Markov State model을 적용하여 RCM 계획을 수립하기 위해서는 각 상태의 정상상태 확률과 Visit Frequency의 계산이 필요하다.

시스템의 상태가 State  $i$ 에서 State  $j$ 로의 천이율을  $a_{ij} (i \neq j)$ 이라 하면 천이행렬(Transition rate matrix)은  $A = [a_{ij}]$ 로 정의된다. 여기서 대각 요소(Diagonal elements)는  $a_{ii} = -\sum_{j \neq i} a_{ij}$ 이다. 또한 시간  $t$ 에 시스템이 State  $i$ 에 존재할 확률을  $P_i(t)$ 이며 상태 확률 벡터(State probability vector)는  $P(t) = [P_0(t), P_1(t), \dots, P_F(t)]$ 로 표현된다. 벡터  $P(t)$ 는 식 (1)과 같은 Kolmogorov Differential Equations을 이용하면 얻을 수 있다.

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A \quad (1)$$

시간  $t$ 가  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $P_i(t)$ 는 Steady State이므로 식 (2)와 같이 표현되며  $P_i$ 는 Markov State Model에서 정상상태 확률이라 한다.

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) \quad (2)$$

또한  $\dot{P}_i(t)$ 를  $dP_i(t)/dt$ 이라 하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{P}_i(t) = 0 \text{ for } i = 0, 1, \dots, F \quad (3)$$

따라서  $\mathbb{P} = [P_0, P_1, \dots, P_F]$ 는 식 (4)를 만족해야 한다.

$$\mathbb{P} \cdot \mathbb{A} = 0, \quad \sum_{i=0}^F P_i = 1 \quad (4)$$

정상 상태에서 State  $j$ 에 대한 Visit Frequency는 다음과 같다.

$$f_j = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^F P_k \cdot a_{kj} \quad (5)$$

여기서,  $a_{kj}$  : State  $k$ 에서 State  $j$ 로의 천이율

### 3. 시스템 상태의 구분

Markov State Model을 적용하기 위한 각 확률적 상태 기준은 표 1과 같다 [2].

표 1 확률적인 상태(EBL 구분 기준)  
Table 1 Main state condition in EBL, Norway

State	설 명
1	성능저하 조짐 없음
2	성능저하 조짐 약간 있음. 처음 상태보다 현저히 악화된 상태
3	심각한 성능저하. 처음 상태보다 상당히 악화된 상태
4	위험한 상태

표 1에서 4가지로 나눈 확률적 시스템 상태에 고장상태(Failure State)를 5번째 상태로 나타내어서 Markov Model에 적용하였다. 5번째 상태는 시스템의 상태가 위험한 상태인 4번째까지 도달하였지만, PM을 실행하지 않아 생기는 고장이거나, 예측할 수 없는 고장에 의해 도달한 상태를 의미 한다.

### 4. Main State and Sub State

표 1을 적용하여 Markov State Model을 사용하기 위해서 시스템의 상태를 그림 1로 나타내었다. 5개로 표현되어 있는 각각의 상태를 중요상태(Main State)라 하고, 본 논문에서는  $m$  번째 Main state를 Main state  $m$ 라 정의하였다.

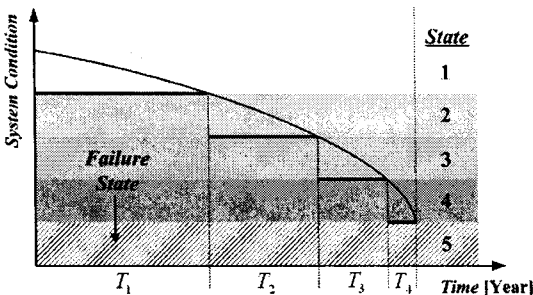


그림 1 시스템의 중요상태의 수종과 수명곡선  
Fig. 1 Technical levels for main condition and life curve

각각의 Main State  $m$ 의 길이를 나타내는  $T_m$ 은 불확실성을 가지고 있으므로 확률분포(Probability Distribution)로 나타

낼 필요가 있다. 따라서 Main State  $m$ 을 감마분포로 표현하며 각 상태는 기대치(Expectation)와 분산(Variance)을 가지고 있고  $T_m$ 은 Main State 에 머무는 시간이 된다. 따라서 Main State 에서 감마분포의 고장밀도함수(Failure Density Function)는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{1}{\alpha_m^{\beta_m} \Gamma(\beta_m)} \cdot t^{\beta_m-1} \cdot e^{-\frac{t}{\alpha_m}} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_m$  : 척도 모수 (Scale parameter)

$\beta_m$  : 형태 모수 (Shape parameter) 이다.

그리고  $\alpha_m$ 과  $\beta_m$ 는 관계는 식 (7), (8)과 같다.

$$\beta_m = E(T_m)^2 / Var(T_m) \quad (7)$$

$$E(T_m) = \alpha_m \beta_m \quad (8)$$

여기서,  $E(T_m)$ ,  $Var(T_m)$ : 감마분포의 기대치와 분산

감마분포로 표현되는 Main State  $m$ 은 시스템의 상태를 더욱 세분화하여 표현하기 위해,  $S_m$ 개의 지수분포로 표현하였다. 여기서  $S_m$ 은 Main State  $m$  안에 존재하는 지수분포의 수이며, 전체 Main State의 모든 지수분포의 수,  $s = 1, 2, \dots, S_m$ 으로 표현된다. 그리고 지수분포는 Main State 안에 존재하는 Sub State라 정의 한다. 감마분포는 지수분포의 합으로 표현되므로 Main State  $m$ 에서 감마분포의  $\beta_m$ 와  $S_m$ 은 식 (9)와 같은 관계가 성립한다.

$$S_m \geq \beta_m \quad S_m \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (9)$$

여기서,  $S_m$  : Main state  $m$ 안에 존재하는 지수분포의 수

지수분포의 기대치와 분산의 관계는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$Var(T_{m,s}) = E(T_{m,s})^2 \quad (10)$$

여기서,  $E(T_{m,s})$  : Main State  $m$ 에서의  $s$ 번째 Sub State의 기대치

$Var(T_{m,s})$  : Main State  $m$ 에서의  $s$ 번째 Sub State의 분산

지수분포로 표현되는 모든 Sub State가 확률적으로 독립이라면,  $E(T_{m,s})$ 와  $Var(T_{m,s})$ 는 식 (11), (12)와 같이 표현된다.

$$E(T_m) = \sum_{s=1}^{S_m} E(T_{m,s}) \quad (11)$$

$$Var(T_m) = \sum_{s=1}^{S_m} Var(T_{m,s}) \quad (12)$$

일반적으로 설비의 상태는 수명이 다할수록 악화되는 정도가 가속되어지므로, 이러한 상황을 고려하기 위해 지수분포로 표현되는 임의의 Sub State와 그 이전 Sub State의 기대치의 관계에 가중치를 두어 정의하면 식 (13)과 같다.

$$E(T_{m,s}) = f_{red,m} \cdot E(T_{m,s-1}) \quad (13)$$

여기서,  $f_{red,m}$  : 감소인자(Reduction factor) ( $f_{red,m} < 1$ )

첫 번째 Sub State의 기대치인  $E(T_{m,1})$ 을 이용하여 식 (13)을 표현하면 식 (14)와 같다

$$E(T_{m,s}) = E(T_{m,1}) \cdot (f_{red,m})^{(s-1)} \quad (14)$$

또한, 식 (14)를 이용하여  $E(T_m)$ 을 나타내면 식 (15)와 같이 정의된다.

$$E(T_m) = E(T_{m,1}) \cdot \sum_{s=1}^{S_m} (f_{red,m})^{(s-1)} \quad (15)$$

그리고  $T_m$ 의 분산은 식 (12)과 식 (15)를 이용하면 식 (16)과 같이 정리된다.

$$Var(T_m) = E(T_{m,1})^2 \cdot \sum_{s=1}^{S_m} [(f_{red,m})^{(s-1)}]^2 \quad (16)$$

결국, 감마분포의 형태 모수  $\beta_m$ 은 식 (7), (15), (16)을 통해 식 (17)와 같은 관계식으로 표현된다.

$$\beta_m = \frac{\left[ \sum_{s=1}^{S_m} (f_{red,m})^{(s-1)} \right]^2}{\sum_{i=1}^{S_m} [(f_{red,m})^{(s-1)}]^2} \quad (17)$$

$E(T_{m,1})$ 과  $f_{red,m}$ 은 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다. 또한 State F를 고장상태(Failure state)라 하면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = \sum_{m=1}^4 S_m + 1 \quad (18)$$

## 5. Markov State Model

### 5.1 가정 (Assumptions)

Markov State Model을 적용하기 위해서 다음과 같은 내용을 가정한다.

1. 시스템의 상태가 악화되는 상태를 Markov State Model을 이용하여 표현 한다.
2. 시스템의 상태를 알기 위한 검사를 통해서만 시스템의 악화 정도를 파악한다.
3. 검사는 시스템에 일정한 간격으로 행해지며 완벽하고 시스템 상태에 영향을 미치지 않는다.
4. 시스템의 상태가 Main State 4에 있을 때 PM을 수행한다.
5. 시스템이 고장상태가 되면 CM(Corrective Maintenance)을 시행한다.
6. PM과 CM은 완벽하므로 수리나 교체 후 시스템은 새것과 같은(as good as new) 상태가 된다.
7. CM 수행에 필요한 비용은 PM 수행에 필요한 비용 보다

비싸며 PM수행에 필요한 비용은 검사 비용 보다 비싸다.

### 5.2 Markov State Model

시스템의 상태가  $i$ 번째 상태에서  $i+1$ 번째 상태로 옮겨질 전이율을  $\lambda_i$ 라 한다.

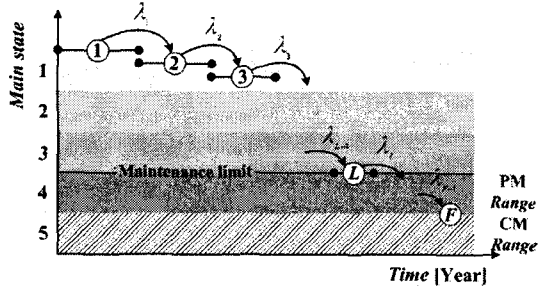


그림 2 Markov State Model을 이용한 유지보수 계획  
Fig. 2 Maintenance strategy in the Markov state model

따라서 시스템이 State  $i$ 에 존재할 기대치인  $E(T_i)$ 의 관계는 식 (19)와 같으며 그림 2와 같이 표현한다.

$$E(T_i) = \frac{1}{\lambda_i} \quad (19)$$

PM을 실시할 기준(Maintenance Limit)을  $L$ 로 나타내면 시스템의 상태가  $L \leq i < F$ 일 때 PM을 실시하게 되며 CM은 시스템이 고장을 일으킬 때 실시한다.

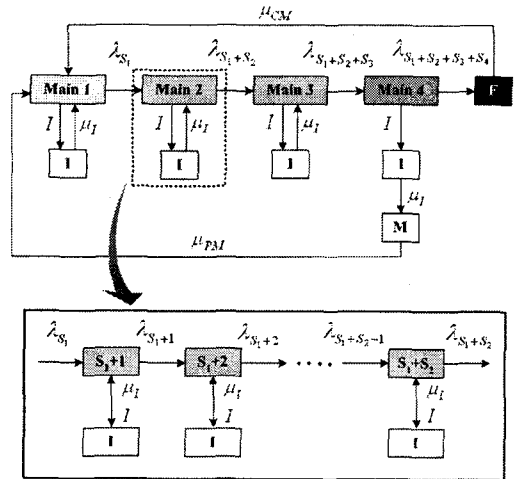


그림 3 Markov State Model에서의 Main State와 Sub State  
Fig. 3 Main state and Sub state in Markov state model

PM을 실시할 기준, 즉 시스템의 상태가 Main State 4에 머물러 있음을 판단하기 위해서는 시스템의 상태를 알기 위한 검사를 실행하고 실행결과 시스템의 상태가 Main State 4에 있을 경우에 PM을 실시하며 블록 다이어그램으로 표현을 하면 그림 3과 같다. Main 1, 2, 3 그리고 4는 각각 Sub State를 포함하고 있으며, State F는 시스템이 고장 난 상태를 표현한

다. 그리고 State  $I$ 는 시스템의 상태를 알기 위한 검사를 나타내고 State  $M$ 은 Main 4에서 검사 이후 PM실행을 나타낸다. PM과 CM은 완전한 것으로 가정하므로 실행 후 시스템의 상태는 처음과 같은 상태로 돌아가게 된다.

그림 3에서  $1/I$ ,  $1/\mu_I$ ,  $1/\mu_{CM}$  그리고  $1/\mu_{PM}$ 은 각각 아래와 같다.

- $1/I$  : 시스템의 상태를 알기 위한 검사의 주기(Interval)
- $1/\mu_I$  : 검사 실행에 필요한 시간
- $1/\mu_{CM}$  : CM 실행에 필요한 시간
- $1/\mu_{PM}$  : PM 실행에 필요한 시간

### 6. 유지보수 비용 계산

1년 당 시스템을 운영하는데 필요한 비용 즉, 1년 당 CM, PM 그리고 시스템의 상태를 알기 위한 검사에 필요한 비용의 계산은 정상상태 확률과 Visit Frequency를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 PM\ cost &= C_P \times frequency\ of\ maintenance \\
 CM\ cost &= C_C \times frequency\ of\ failure \\
 Inspection\ cost &= C_I \times frequency\ of\ inspection
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

여기서,  $C_P$ ,  $C_C$ ,  $C_I$ : PM, CM 그리고 검사 1회 실행에 필요한 비용 [Won/Year]

그러므로 1년 당 시스템운영에 필요한 총 비용은 다음과 같다.

$$Total\ cost = PM\ cost + CM\ cost + Inspection\ cost \tag{21}$$

### 7. 사례 연구

본 논문에서 제안한 Markov State Model을 이용한 RCM 계획 수립 방법을 한국의 복합화력 발전 설비에 적용하였다. 시스템의 RCM 평가를 위해서는 시스템 및 하위시스템의 기능을 확인하고, 시스템 및 하위시스템의 구분 수준을 결정하여 기능별로 블록화 하는 과정이 필요하다. 따라서 사례연구로 진행될 복합화력 발전설비에 위의 과정을 적용시키면 그림 4와 같다.

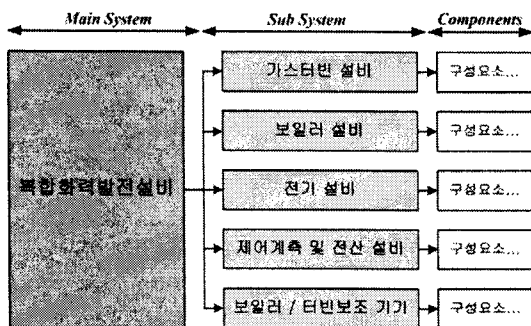


그림 4 복합화력 발전설비의 하위시스템 및 구성요소의 구분  
Fig. 4 Decomposition level of system of combustion turbine generator

사례연구를 복합화력 발전설비의 하위 시스템(Sub System)

에 적용을 하였으나 ‘보일러 / 터빈보조 기기’는 데이터 취득이 어려움에 따라 ‘가스터빈 설비’, ‘보일러 설비’, ‘전기 설비’ 그리고 ‘제어계측 및 전산 설비’의 4가지 설비에 Markov State Model을 적용하였다.

수집된 하위시스템의 수명을 고려하여 가정한 각 Main State의 기대치와 표준편차(Standard Deviation)는 표 2와 같다.

표 2 복합화력 발전설비의 각 하위시스템의 Main State에 대한 모델링

Table 2 Main state modeling for each sub-system(equipment) in combustion turbine generator

Main State $k$	$E(T_k)$ [Years]	$SD(T_k)$ [Year]
가스터빈 설비	1	4.793
	2	0.799
	3	0.559
	4	0.240
보일러 설비	1	4.187
	2	0.698
	3	0.489
	4	0.209
전기 설비	1	5.330
	2	0.888
	3	0.622
	4	0.266
제어계측 및 전산설비	1	1.549
	2	0.258
	3	0.181
전산설비	4	0.077

각 Main State의 기대치와 분산에 Markov State Model를 적용하여 표 3과 같이 모든 하위시스템의  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$ ,  $f_{red,m}$  그리고  $E(T_{m,1})$ 을 계산하였다.

표 3 각 하위시스템의 Main State에 대한  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $f_{red,k}$ 와  $E(T_{k,1})$

Table 3 Calculated  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $f_{red,k}$  and  $E(T_{k,1})$  for main state of each sub-system(equipment)

Main State $k$	$\alpha_k$	$\beta_k$	$f_{red,k}$	$E(T_{k,1})$
가스터빈 설비	1	0.521	9.356	0.9121
	2	0.357	2.239	0.4654
	3	0.188	2.977	0.8978
	4	0.119	2.017	0.3878
보일러 설비	1	0.448	9.354	0.9119
	2	0.312	2.234	0.4636
	3	0.164	2.986	0.9195
	4	0.098	2.136	0.4289
전기 설비	1	0.570	9.351	0.9117
	2	0.397	2.235	0.4639
	3	0.210	2.969	0.8822
	4	0.133	2.002	0.3827
제어계측 및 전산설비	1	0.166	9.334	0.9105
	2	0.116	2.224	0.4600
	3	0.061	2.972	0.8877
	4	0.039	1.960	0.7500

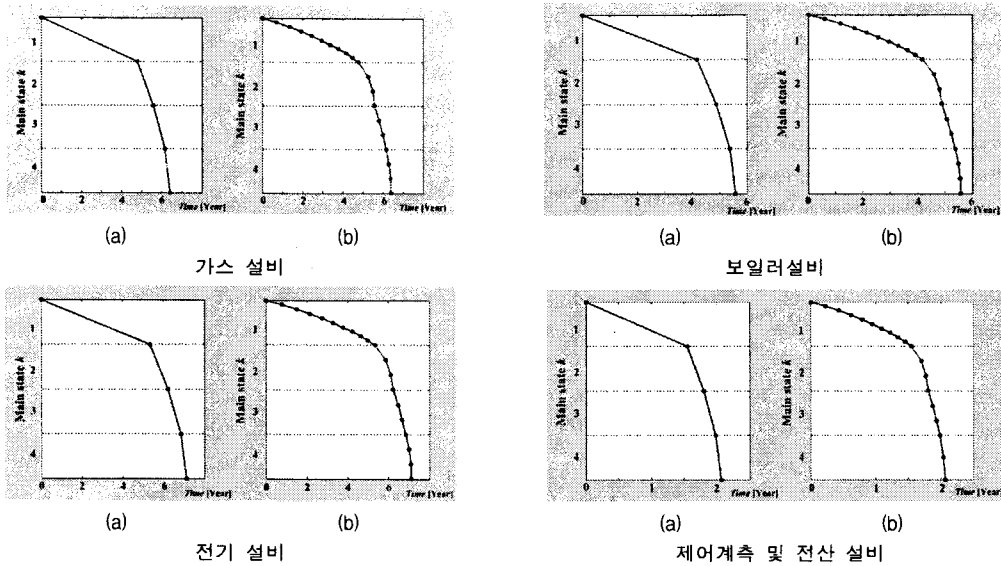


그림 5 모든 하위시스템 (a) 각 Main State를 갖는 수명 곡선과 (b) 모든 Sub State를 갖는 수명 곡선  
 Fig. 5 All sub-system (a) Life curve with main states and (b) all sub states

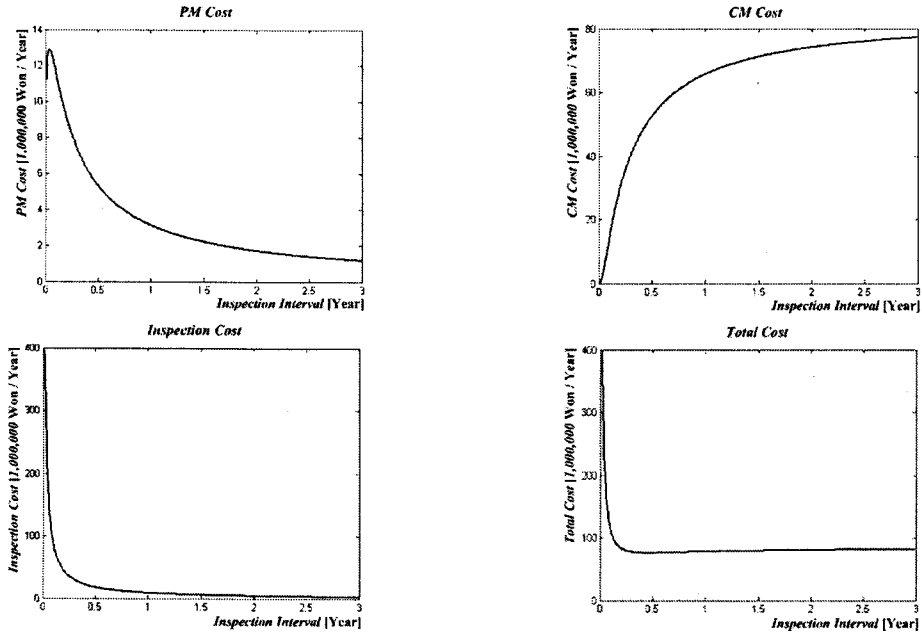


그림 6 전기설비의 PM, CM, 검사 그리고 총 비용 곡선  
 Fig. 6 PM, CM, Inspection and Total cost curve of the electrical device

또한 표 3을 이용하여 4개의 하위시스템의 Main State와 Sub State는 그림 5와 같다.  
 복합화력 발전설비의 하위시스템 중 전기설비의 Main State 1은 10개의 Sub State를 포함하고 있으며 Main State 2, 3 그리고 4는 각각 3개의 Sub State를 포함하고 있음을 표 3을 이용하여 알 수 있다. 그리고 전기설비를 운영하는데 필요한 비용과 유지보수에 필요한 시간은 다음과 같이 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 1/\mu_{CM} &= 0.017 \text{ [Year]} \\
 1/\mu_{PM} &= 0.01 \text{ [Year]} \\
 1/\mu_I &= 0.003 \text{ [Year]} \\
 C_C &= 600 \text{ [1,000,000 Won/Year]} \\
 C_P &= 100 \text{ [1,000,000 Won/Year]} \\
 C_I &= 10 \text{ [1,000,000 Won/Year]}
 \end{aligned}$$

식 (20)과 (21)을 이용하여 그림 6과 같이 시스템의 상태를 알기 위한 검사의 주기를 변화해 가면서 가스터빈설비의 CM 비용, PM 비용, 검사 비용 그리고 총 비용을 표현하였다. 검사 주기가 길어질수록 PM과 검사 실행의 횟수가 줄어들기 때문에 PM 비용과 검사 비용이 줄어든다. 반대로 검사 주기가 길어질수록 CM의 횟수는 증가 하므로 CM 비용도 증가 하게 된다. 따라서 총 비용 곡선에서 비용을 최소화하는 검사주기를 찾을 수 있다.

표 4 하위시스템의 MTTF와 최적의 검사주기  
Table 4 MTTF and optimal inspection interval of sub system [Year]

Sub System	MTTF without PM	MTTF with PM	Inspection Interval
가스터빈 설비	6.391	8.84	0.41
보일러 설비	5.583	8.91	0.44
전기 설비	7.106	11.67	0.47
제어계측 및 전산 설비	2.065	2.72	0.33

또한 표 4는 비용곡선을 이용하여 각 하위 시스템의 최적의 검사 주기와 PM을 시스템에 적용하지 않았을 때의 MTTF(Mean time to failure)와 최적의 검사 주기로 PM을 적용했을 때의 시스템의 MTTF를 나타내었다. PM을 적용하였을 때 시스템의 MTTF가 연장되는 것을 알 수 있다.

## 8. 결론

본 논문에서는 최적의 유지보수 계획 수립방법을 제안하기 위해 RCM 계획 수립 방법에서 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov State Model을 이용하여 RCM 계획을 수립하는 방법을 제안하였고 한국의 복합화력 발전설비에 적용하였다. 또한 시스템의 상태를 알기 위한 검사로 PM실행 시기를 결정하고 CM 비용, PM 비용, 검사 비용 그리고 총 비용을 계산하여 비용을 최소화 하는 최적의 검사 주기를 계산하였다.

검사 주기를 짧게 가져갈수록 시스템의 MTTF는 길게 연장을 시킬 수 있어서 CM의 횟수를 줄일 수 있다. 그렇지만 CM의 횟수를 줄일 수 있는 만큼 PM과 검사 비용이 증가 하므로 비용을 최소화할 수 있는 검사 주기의 계산이 유용하다 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 Markov State Model은 불완전한 PM과 CM을 고려하지 않았다. 따라서 앞으로 이와 같은 사항을 고려해야 할 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- [1] Rausand, "Reliability centered maintenance," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 60, pp. 121-132, 1998
- [2] Ythomas M. Welte, Jørn Vatn and Jørn Heggset, "Markov State Model for Optimization of Maintenance and Renewal of Hydro Power Components," *9<sup>th</sup> PMAPS KTH*, Stockholm, Sweden, 11-15 June, 2006
- [3] P. Jirutitijaroen and C. Singh, "The effect of transformer maintenance parameters on reliability and cost : a probabilistic model," *Electric Power Systems Research*, pp. 213-224, 2004
- [4] George J. Anders and Armando M. Leite da Silva, "Cost Related Reliability Measures for Power System Equipment," *IEEE Trans. Power System*, vol. 15, No. 2, May 2000
- [5] Wenjian Li and Hoang Pham, "An Inspection-Maintenance Model for Systems With Multiple Competing Processes," *IEEE Trans. Reliability*, vol. 54, No. 2, June 2005
- [6] Suprasad V. Amari and Leland McLaughlin, "Optimal Design of a Condition-Based Maintenance Model," *RAMS 2004*
- [7] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluating of Engineering System*, Plenum Press, 1992
- [8] J. Crowder, A. c. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, *Statistical Analysis of Reliability Data*, Chapman and Hall, 1991
- [9] M. Rausand and A. Høyland, *System Reliability Theory*, Wiley-Interscience 2004
- [10] 이승혁, 신준석, 김진오, "Markov State Model을 이용한 복합화력 발전설비의 최적의 유지보수계획 수립", 전기학 회논문지, 제 56A권 2호, pp 248-253, 대한전기학회, 2007. 2.