

시스템의 상태를 고려한 발전설비의 예방 유지보수 계획 수립

論 文

57-8-1

Scheduling of Preventive Maintenance for Generating Unit Considering Condition of System

辛 竣 碩* · 卞 隆 泰** · 金 鎮 吾[†] · 金 炯 徹***

(Jun-Seok Shin · Yoong-Tae Byeon · 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.

Key Words : Markov process, RCM, Preventive Maintenance, Predictive Maintenance, Gamma Distribution

1. 서 론

전력시스템은 전력을 사용하고 있는 수요자들에게 안정적이면서 경제적인 전력공급을 하는 것이 중요하다. 안정적이며 경제적인 전력 공급을 위해서는 여러 중요한 조건들이 있지만 그 중에서 전력시스템을 구성하고 있는 설비들이 안정적 전력공급을 할 수 있는 상태를 유지시키기 위한 적절한 예방 유지보수(PM : Preventive Maintenance) 계획 수립도 고려대상이 될 것이다.

현재 주로 우리나라에서 전력설비에 적용하고 있는 유지보수 계획은 설비 자체의 보존에 초점을 두거나 운영자 입장에서 운영의 편리성만을 지나치게 고려하여 설비의 특성과 운영 상태를 고려하지 않고 일괄적인 주기를 설비에 적용하고 있는데 이러한 형태는 유지보수에 필요한 비용이 과다하게 소요되며 효율성을 감소시키는 결과를 가져온다.

따라서 위와 같은 단점을 보완하기 위해 대상 설비의 기능유지에 계획의 초점을 맞추는 신뢰도 기반 유지보수(RCM : Reliability Centered Maintenance) 계획의 전력시스템 적용연구가 활발히 이루어지고 있다. RCM은 설비의 기능유지에 매우 큰 영향을 미치는 설비와 그렇지 않은 설비를 고장 영향 및 임계분석(FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)을 통하여 선정하고 그에 따라 유지보수 방법을 달리하면서 설비의 기능유지와 경제성 모두를 고려한다[1].

설비에 적용하는 유지보수 계획은 크게 설비에 고장 발생 후 고장의 원인을 제거하는 정비방법으로 설비의 중요성이 상대적으로 덜한 설비에 적용되는 고장정비(Corrective Maintenance)계획, 일정한 시간간격으로 고장을 발생시킬 수 있는 고장원인을 설비의 수리와 교체로 제거하는 정기정비(Routine Preventive Maintenance)계획과 설비 운영 중에 설비의 상태를 감시하는 예측진단을 실시하여 고장이 발생하기 전에 고장원인을 제거하는 예측정비(Predictive Maintenance)계획으로 나누어진다. 특히 예측정비계획은 시스템의 기능유지에 중요한 설비에 적용되며 예측진단에는 설비의 상태를 감시하는 모니터링 장치를 설치하거나 일정한 시간 간격으로 설비의 상태를 감시하는 검사 등이 포함된다[1].

비용을 최소화 하면서 효율성을 최대화하기 위한 예측정비계획의 기존연구에서는 예측정비계획 수립에 필요한 요소(검사, 예방정비와 고장정비)의 확률분포를 계산하여 계획을 수립하는 방법을 적용하였는데 계산이 복잡한 단점이 있다[2,3]. 따라서 본 논문에서는 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov Process를 RCM 계획수립에 적용하여 Markov State Model을 이용한 예측정비계획수립 방법을 제안하였다. Markov State Model은 설비의 상태를 임의의 기준으로 나누어 각 상태에 존재하는 전이율(Transition Rate)을 이용하여 예측진단계획 수립에 필요한 정비 기대치와 비용을 간편하게 계산할 수 있는 장점이 있다[4]. 그러나 Markov State Model을 이용한 예측정비계획 수립을 위해서는 각 상태를 나누는 기준과 전이율 계산의 정확도가 중요한데 기존의 연구에서는 시스템의 상태를 표현하는데 있어서 새로운 개념들을 도입하여 계산이 복잡하며 설비의 특성을 정확히 반영하지 못하는 단점이 있었다[5,6].

본 논문에서는 설비의 수명을 표현하는 FMECA 평가로 고장 발생시 전체 시스템에 미치는 영향이 크다고 판단된 설비에 일정 시간 간격으로 예측진단을 실시하여 설비의 상

[†] 교신저자, 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

* 學生會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士

** 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 韓國 鐵道技術研究院 前任研究員

接受日字 : 2007年 12月 26日

最終完了 : 2008年 6月 18日

태를 확인하고 그 진단 결과에 따라 적절한 예측정비를 시행하는 과정을 Markov State Model로 표현하였다. 특히 천이율을 계산에 새로운 개념을 도입하여 계산의 복잡하며 설비의 특성을 정확히 반영하지 못하는 단점을 보완하기 위해 설비의 수명 특성을 포함한 누적고장분포(CFD: Cumulative Failure Distribution)를 이용하였다. 누적고장분포는 설비의 고장률과 수명 등 유지보수 계획수립에 필요한 정보를 포함하고 있다. 또한 운영 중인 설비의 고장이력을 분석하여 추정하므로 설비의 자체 수명특성 뿐만 아니라 다른 설비와 함께 운영되면서 나타나는 특성도 함께 포함되어 있어 설비의 수명특성이 정비계획에 충분히 반영될 수 있는 장점이 있다. 시스템의 상태를 나누는 기준을 참고하여 그 기준에 따라 나누어진 각 상태를 감마분포와 지수분포(Exponential Distribution)로 정의하고 각각의 상태사이 존재하는 천이율을 계산 하여 계획수립에 이용하였다. 또한 유지보수를 시행하는데 소요되는 비용은 각 상태의 정상상태 확률(Steady State Probability)과 방문주기(Visit Frequency)를 이용하여 계산한 후 시스템을 운영에 필요한 비용을 최소화하는 유지보수 계획수립 방법을 제안하였다. 사례연구에서는 우리나라 복합화력 발전설비 1기에 대하여 본 논문에서 제안한 Markov State Model을 적용하였다.

2. Markov State Model

2.1 가정(Assumptions)

Markov State Model을 적용하기 위해서 다음과 같은 내용을 가정한다.

1. 시스템의 상태가 악화되는 상태를 Markov State Model을 이용하여 표현한다.
2. 예측진단의 결과를 통해서만 운영 중인 설비의 상태와 악화 정도를 파악한다.
3. 예측진단은 설비에 일정한 간격으로 행해지며 완벽하게 설비의 상태를 파악하며 운영 중인 설비 상태에 영향을 미치지 않는다.
4. 설비의 상태가 Main State 4에 있을 때 PM을 수행한다.
5. 설비가 고장상태이면 고장정비를 시행한다.
6. 예방정비와 고장정비는 완벽하므로 수리나 교체 후 시스템은 새것과 같은(as good as new) 상태가 된다.
7. 고장정비 수행에 필요한 비용은 예방정비 수행에 필요한 비용 보다 비싸며 예방정비 수행에 필요한 비용은 예측진단 비용보다 비싸다.

2.2 Main State와 Sub State

Markov State Model을 적용하기 위한 각 확률적 상태 기준이 필요한데 그 기준은 노르웨이의 EBL(Norwegian Electricity Industry Association)에서 시스템의 상태를 나누는 기준을 참고하였다[8]. 4가지로 나눈 확률적 시스템 상태에 고장상태(Failure State)를 5번째 상태로 나타내어서 Markov Model을 적용하였다.

Markov State Model을 적용하기 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. 각각의 Main State m 의 시간의 길이를 나타내는 T_m 는 불확실성을 가지고 있으므로 확률분포(Probability Distribution)로 나타낼 필요성이 있다. 따라서 Main State m 를 감마분포로 표현하며 각 상태는 기

대치(Expectation)와 분산(Variance)을 가지고 있고 T_m 는 Main State m 에 머무를 시간이 된다. 따라서 Main State m 에서 감마분포의 고장밀도함수(Failure Density Function)는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, α_m : Main State m 에서의 척도모수(Scale Parameter)

β_m : Main State m 에서의 형상모수(Shape Parameter)

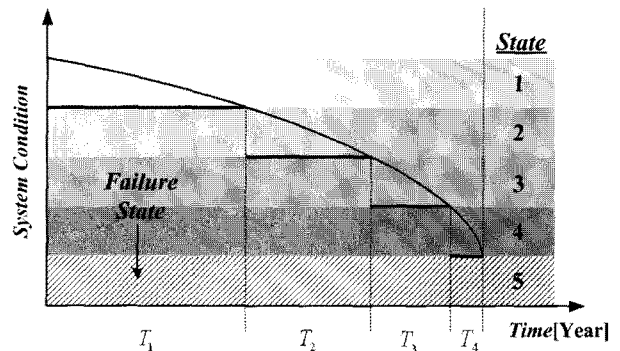


그림 1 시스템의 중요상태의 수준과 수명 곡선

Fig. 1 Technical levels for main condition and life curve

감마분포로 표현되는 Main State m 는 시스템의 상태를 더욱 세분화하여 표현하기 위해, 감마분포는 지수분포의 합으로 표현되는 특성을 이용하여 S_m 개의 지수분포로 표현하였다. 여기서 S_m 는 Main State m 안에 존재하는 지수분포의 수이며, 전체 Main State의 모든 지수분포의 수, $s = 1, 2, \dots, S_m$ 로 표현된다. 그리고 지수 분포는 Main State 안에 존재하는 Sub State라 정의된다.

지수분포로 표현되는 모든 Sub State가 확률적으로 독립이라면, $E(T_m)$ 와 $Var(T_m)$ 는 식 (2)와 (3)과 같이 표현된다.

$$E(T_m) = \sum_{s=1}^{S_m} E(T_{m,s}) \quad (2)$$

$$Var(T_m) = \sum_{s=1}^{S_m} Var(T_{m,s}) \quad (3)$$

여기서, $E(T_m), Var(T_m)$: Main State m 의 기대치와 분산

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

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

일반적으로 설비의 상태는 수명이 다할수록 악화되는 정도가 가속되어지므로, 이러한 상황을 고려하기 위해 지수분포로 표현되는 임의의 Sub State와 그 이전 Sub State의 기대치의 관계를 가중치를 두어 정의하면 식 (4)와 같다.

$$E(T_{m,s}) = f_{red,m} \cdot E(T_{m,s-1}) \quad (4)$$

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

따라서, 식 (4)를 이용하여 $E(T_m)$ 와 $Var(T_m)$ 를 나타내면 식 (5)와 (6)과 같이 정의된다.

$$E(T_m) = E(T_{m,1}) \cdot \sum_{s=1}^{S_m} (f_{red,m})^{(s-1)} \quad (5)$$

$$Var(T_m) = E(T_{m,1})^2 \cdot \sum_{s=1}^{S_m} [(f_{red,m})^{(s-1)}]^2 \quad (6)$$

여기서, $E(T_{m,1})$: Main State m 의 첫 번째 Sub State의 기대치

Main State와 Sub State의 관계를 이용하여 Main State로 나누어진 설비의 상태를 Sub State로 세분화 하여 표현할 수 있다. 또한 고장상태(Failure state) F 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$F = \sum_{m=1}^4 S_m + 1 \quad (7)$$

2.3 Markov State Model의 구성

시스템의 상태가 i 번째 상태에서 $i+1$ 번째 상태로 옮겨질 전이율을 λ_i 라 하면 시스템이 State i 에 존재할 기대치인 $E(T_i)$ 의 관계는 식 (8)과 같으며 그림 2와 같이 표현한다.

$$E(T_i) = 1/\lambda_i \quad (8)$$

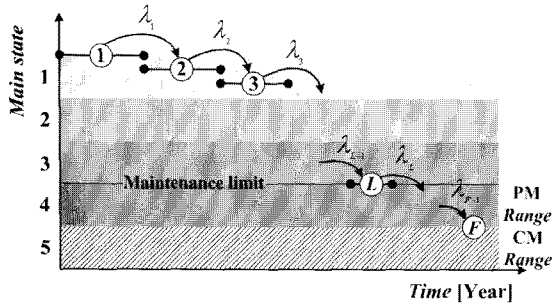


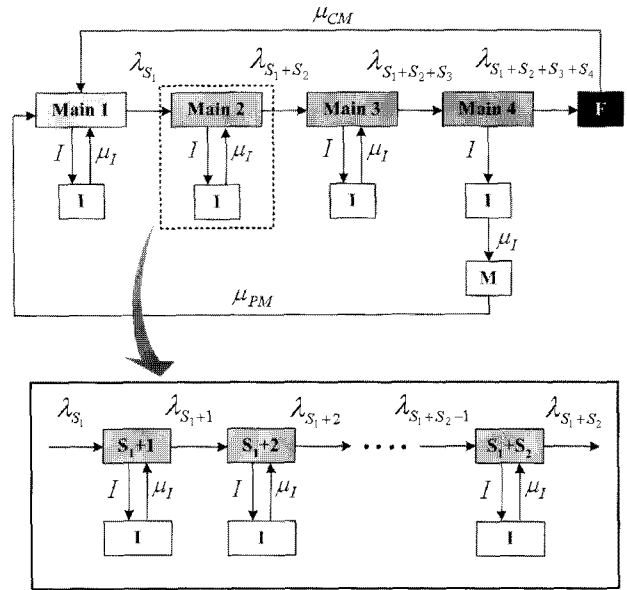
그림 2 Markov State Model을 이용한 유지보수 전략
Fig. 2 Maintenance strategy in the Markov state model

예방정비의 방법 중 예측정비계획은 설비의 상태를 예측 진단을 통하여 정비실행 여부를 판단하게 된다. 그림 2와 같이 예방정비를 실시할 기준(Maintenance Limit)을 L 로 나타내어 운영 중인 설비의 상태가 $L \leq i < F$ 일 때 즉 Main State 4에 있음이 판단되면 예방정비를 실시하므로 고장을 발생시킬 수 있는 원인을 제거하여 설비의 고장 발생을 예방하며, 예상치 못한 고장이 발생하면 고장정비를 실시하여 고장원인을 제거한다.

이와 같은 예측정비계획 과정을 앞에서 정의한 Main State와 Sub State를 이용하여 블록 다이어그램으로 표현하면 그림 3과 같다. Main State 1, 2, 3 그리고 4는 각각 Sub State를 포함하고 있으며, State F 는 시스템이 고장 난 상태를 표현한다. 그리고 State I 는 설비의 상태를 알기 위한 예측진단이 실시되고 있는 상태를 나타내며 State M 은 Main 4에서 예측진단 이후 예방정비가 시행되는 상태를 나타낸다. 예방정비와 고장정비는 완전한 것으로 가정하였으므로 실행 후 설비의 상태는 처음과 같은 상태로 돌아가게 된다.

$1/I$ 의 값에 따라 예측진단이 실행되는 시간 간격이 달라 지므로 값 결정이 중요하며 적용되는 시간 간격은 일정하

다. 또한 $1/\mu_I$, $1/\mu_{CM}$ 과 $1/\mu_{PM}$ 은 유지보수를 적용하는 설비의 특성과 진단방법의 특성에 따라 정해지는 특정한 값이다.



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

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

3. 비용분석

예측정비계획 수립에 있어서 정비 업무에 필요한 비용은 다음을 이용하여 계산한다.

3.1 정상상태 확률과 Visit Frequency

시스템의 상태가 State i 에서 State j 로의 전이율을 $a_{ij}(i \neq j)$ 이라 하면 전이행렬(Transition rate matrix)은 $A = [a_{ij}]$ 로 정의 된다. 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 (9)와 같은 Kolmogorov Differential Equation을 이용하면 얻을 수 있다.

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A \quad (9)$$

시간 t 가 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $P_i(t)$ 는 정상상태(Steady State)이므로 식 (10)과 같이 표현되며 P_i 는 Markov State Model에서 정상상태 확률이라 한다.

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) \quad (10)$$

또한 $\dot{P}_i(t)$ 를 $dP_i(t)/dt$ 이라 하면 식 (11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{P}_i(t) = 0 \text{ for } i = 0, 1, \dots, F \quad (11)$$

따라서 $\mathbb{P} = [P_0, P_1, \dots, P_F]$ 는 식 (9) ~ (11)의 관계를 통하여 식 (12)을 만족해야 한다.

$$\mathbb{P} \cdot \mathbf{A} = 0, \quad \sum_{i=0}^F P_i = 1 \quad (12)$$

또한, 정상 상태에서 State j 에 대한 방문주기(Visit Frequency)는 다음과 같다[10].

$$f_j = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^F P_k \cdot a_{kj} \quad (13)$$

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

3.2 예측정비계획 비용

예측정비계획은 예방정비, 고장정비와 예측진단비용이 각각 필요하므로 방문주기를 이용하여 1년 당 예측정비계획을 실행하는데 필요한 각각의 비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} PM \text{ Cost} &= C_P \times \text{frequency of maintenance} \\ CM \text{ Cost} &= C_C \times \text{frequency of failure} \\ Inspection \text{ Cost} &= C_I \times \text{frequency of inspection} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $PM, CM, Inspection \text{ Cost}$: 예방정비, 고장정비, 예방정비 1년 당 비용

C_P, C_C, C_I : 예방정비, 고장정비, 예측진단 1회 실행 비용 [Won/Time]

그러므로 1년 당 예측정비계획에 필요한 총 비용은 예방정비, 고장정비, 예방정비의 1년 당 비용의 합으로 구할 수 있다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 Markov State Model을 이용한 RCM 계획 수립 방법을 우리나라의 복합화력 발전 설비에 적용하였다. 유지보수 계획을 수립하기 전에 RCM 절차 중 하나인 FMECA 평가를 시스템에 적용하여야 한다. 기본적인 절차로는 대상 설비를 파악하고 평가 범위를 결정하고 그에 따라 설비를 기능별로 묶어 하위시스템으로 선정하고 하는 것이다. 또한 하위시스템의 중요도를 파악하여 각 하위시스템에 적합한 정비 업무를 선정하는데 필요한 정보를 제공한다. 이러한 절차를 복합화력 설비에 적용하여 가스터빈 설비, 보일러 설비, 전기 설비, 제어계측 및 전산 설비와 보일러 / 터빈보조 기기를 하위 시스템으로 선정하였다. RCM은 계획 수립 범위 수준에 따라 정비업무 선정이 달라지는데 본 사례연구에서는 복합화력 설비를 크게 5개로 분류하고 평가범위를 5개의 하위시스템으로 한정하였으므로 하위시스템 모두 전체시스템에 미치는 영향이 커 예측정비계획 수립 절차를 5개의 하위시스템에 적용하였다. 그러나 데이터 취득이 어려운 보일러 / 터빈보조 기기는 사례연구에서 제외하였다.

수집된 하위시스템의 수명을 고려하여 가정한 각 Main State의 기대치와 표준편차는 표 1과 같다.

표 1 복합화력 발전설비의 각 하위시스템의 Main State에 대한 모델링

Table 1 Main state modeling for each sub-system (equipment) in combustion turbine generator

Main State m		$E(T_m)$ [Years]	$SD(T_m)$ [Year]
가스터빈 설비	1	4.793	1.567
	2	0.799	0.534
	3	0.559	0.324
	4	0.240	0.169
보일러 설비	1	4.187	1.369
	2	0.698	0.467
	3	0.489	0.283
	4	0.209	0.148
전기 설비	1	5.330	1.743
	2	0.888	0.594
	3	0.622	0.361
	4	0.266	0.188
제어계측 및 전산설비	1	1.549	0.507
	2	0.258	0.173
	3	0.181	0.105
	4	0.077	0.055

각 Main State의 기대치와 분산에 Markov State Model를 적용하여 표 2와 같이 모든 하위시스템의 $\alpha_m, \beta_m, f_{red,m}$ 과 $E(T_{m,1})$ 을 계산하였다. 또한 표 2를 이용하여 가스터빈 설비의 Main State와 Sub State는 그림 4와 같다. 복합화력 발전설비의 하위시스템 중 가스터빈설비의 Main State 1은 10개의 Sub State를 포함하고 있으며 Main State 2, 3과 4는 각각 3개의 Sub State를 포함하고 있음을 그림 4를 이용하여 알 수 있다.

표 2 각 하위시스템의 Main State에 대한 $\alpha_m, \beta_m, f_{red,m}$ 와 $E(T_{m,1})$

Table 2 Calculated $\alpha_m, \beta_m, f_{red,m}$ and $E(T_{m,1})$ for main state of each sub-system(equipment)

Main State m		α_m	β_m	$f_{red,m}$	$E(T_{m,1})$
가스터빈 설비	1	0.521	9.356	0.9121	0.7005
	2	0.357	2.239	0.4654	0.4750
	3	0.188	2.977	0.8978	0.2067
	4	0.119	2.017	0.3878	0.1560
보일러 설비	1	0.448	9.354	0.9119	0.6122
	2	0.312	2.234	0.4636	0.4159
	3	0.164	2.986	0.9195	0.1769
	4	0.098	2.136	0.4289	0.1296
전기 설비	1	0.570	9.351	0.9117	0.7801
	2	0.397	2.235	0.4639	0.5288
	3	0.210	2.969	0.8822	0.2338
	4	0.133	2.002	0.3827	0.1740
제어계측 및 전산설비	1	0.166	9.334	0.9105	0.2278
	2	0.116	2.224	0.4600	0.1543
	3	0.061	2.972	0.8877	0.0676
	4	0.039	1.960	0.7500	0.0440

또한 최적의 예측진단 주기를 계산하기 위해 각 하위시스템의 유지보수에 필요한 비용과 시간을 표 3과 4와 같이 가정하였다. 식 (14)와 (15)를 이용하여 예측정비계획에 필요한 비용을 그림 5와 같이 나타내었다. 설비의 상태를 알기 위한 예측진단 실행의 주기를 0년부터 1년까지 변화해 가면서 4개의 하위시스템의 고장정비 비용, 예측정비 비용, 예측진단비용과 총 비용을 표현하였다.

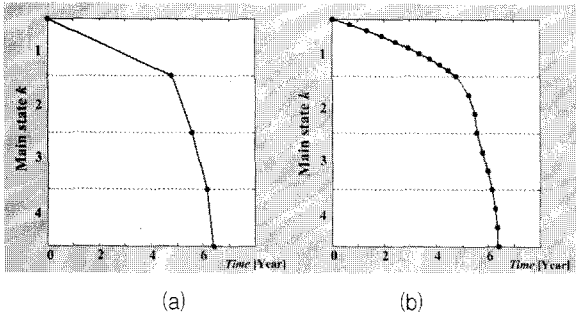


그림 4 가스터빈 설비의 (a) 각 Main State, (b) 모든 Sub State의 수명 곡선

Fig. 4 gas turbine equipment (a) Life curve with main states and (b) all sub states

예측진단 주기가 길어질수록 예방정비와 예측진단 실행의 횟수가 줄어들기 때문에 예방정비 비용과 예측진단 비용이 줄어든다. 그러나 예측진단의 실행 횟수가 줄어들면서 설비의 상태를 알 수 있는 기회와 자료의 부족으로 적절한 예측정비 실행의 기회가 줄어들고 고장 발생 빈도가 높아지므로 고장정비의 횟수는 증가하여 고장정비 비용도 증가 하게 된다. 따라서 총 비용 곡선에서 총 비용을 최소화하는 적절한 예측진단 주기를 찾을 수 있다

표 3 모든 하위시스템의 유지보수에 필요한 시간

Table 3 Maintenance time of all sub system

Sub System	$1/\mu_{CI}$ [Year]	$1/\mu_{PM}$ [Year]	$1/\mu_I$ [Year]
가스터빈 설비	0.05	0.02	0.003
보일러 설비	0.07	0.03	0.005
전기 설비	0.1	0.05	0.01
제어계측 및 전산 설비	0.04	0.02	0.007

표 4 모든 하위시스템의 예측진단과 정비 1회 실행에 필요한 비용

Table 4 Cost for Inspection, PM and CM

Sub System	C_C [원]	C_P [원]	C_I [원]
가스터빈 설비	1 억	3천만	1천만
보일러 설비	9천만	2천만	7백만
전기 설비	1억 2천만	5천만	1천 2백만
제어계측 및 전산 설비	5천만	2천만	1천만

표 5는 비용곡선을 이용하여 각 하위 시스템의 최적의 예측진단 주기를 나타내었으며 예방정비 계획을 적용하지 않았을 때의 MTTF(Mean Time to Failure)와 최적의 예측진단 주기로 예측정비를 적용했을 때의 시스템의 MTTF도 나타내었는데 예측정비 계획을 적용하였을 때 각 하위 시스템의 MTTF가 연장되는 것을 확인할 수 있다.

표 5 하위시스템의 MTTF, 최적의 검사주기와 PM비용

Table 5 MTTF, optimal inspection interval and PM cost of sub system

Sub System	MTTF without PM [Year]	MTTF with PM [Year]	최적의 검사주기 [Year]	1년당 PM 비용 [백만원]
가스터빈 설비	6.391	16.530	0.20	12.05
보일러 설비	5.583	15.092	0.17	11.91
전기 설비	7.106	15.179	0.30	14.34
제어계측 및 전산 설비	2.065	3.105	0.18	22.02

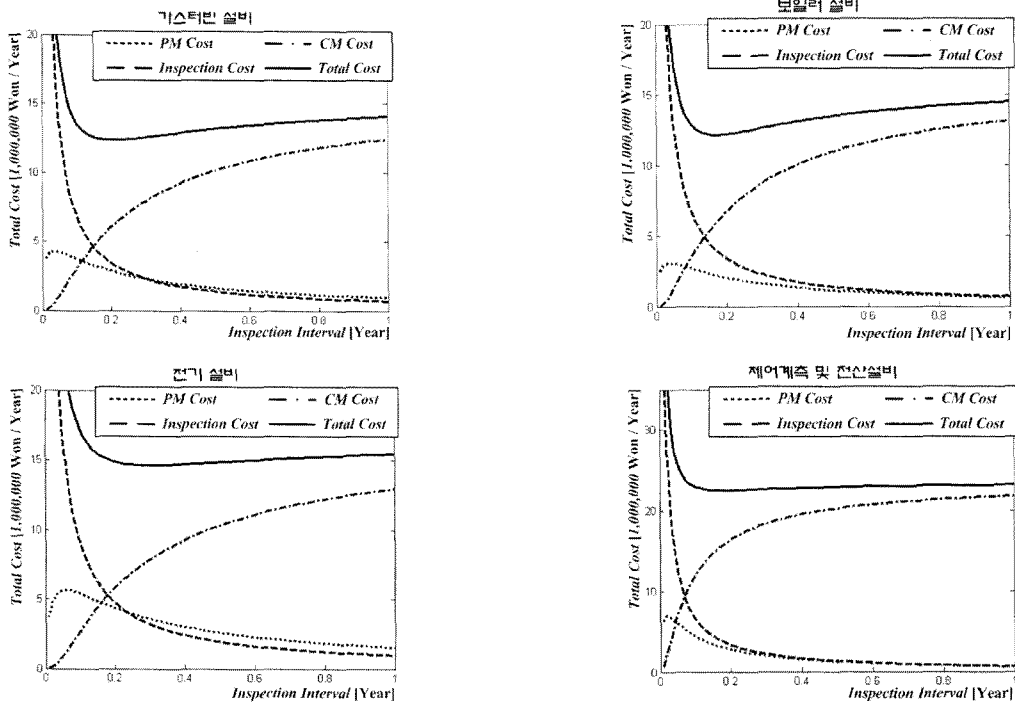


그림 5 모든 하위시스템의 예측진단, 고장정비, 예측정비와 총 비용 곡선

Fig. 5 Inspection, CM, PM and Total cost curve of the all sub system

또한 최적의 검사주기로 예방정비를 실행했을 때 필요한 1년당 비용도 표 5에 나타내었다. 예방정비를 실시하지 않으면 예방정비 계획을 적용하지 않았을 때의 MTTF 간격으로 시스템의 고장 위험이 커 고장정비를 실시할 가능성이 높아진다. 따라서 단기적으로는 예방정비를 실시하는 것이 비용이 많이 들지만 장기적으로는 예상치 못한 고장으로 인한 비용 손실을 줄이고 안정적인 운영을 통한 설비의 신뢰성을 높일 수 있으므로 전체 설비의 운영에 크게 영향을 미치는 설비에 대해 예측정비계획을 적용하는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 예방정비계획 중 최적의 예측정비계획 수립방법을 제안하기 위해 RCM 계획 수립 방법에서 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov State Model을 이용하여 정비계획을 수립하는 방법을 제안하였고 우리나라의 복합화력 발전설비에 적용하였다.

운영 중인 설비의 상태를 성능 저하를 표현하는 기준에 따라 나누고 각 상태에 존재하는 시간이 불확실하므로 확률분포로 표현하였다. 그리고 각 상태 사이에 존재하는 전이율은 설비의 누적고장분포를 이용하여 계산하고 또한 예측정비계획에 필요한 비용을 계산하였다.

예측정비계획에서는 예측진단 주기를 길게 가져갈수록 예측진단의 실행 횟수와 예측정비 실행 횟수를 줄일 수 있으므로 그에 따라 예측진단과 예방정비의 비용을 줄일 수 있으나 고장을 발생시키는 원인들을 사전에 제거 하지 못하므로 고장 발생 횟수가 증가하고 그에 따라 고장정비 비용이 증가하며 설비의 MTTF 또한 감소한다. 따라서 예측정비계획에서 일정 시간 간격으로 실행되는 예측진단의 주기 결정이 정비계획의 안정성과 경제성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 예측정비계획 수립시 충분히 고려를 하여야 한다.

본 논문은 예측정비계획에 필요한 비용 분석을 통하여 정비비용을 최소화 하면서 정비계획의 안정성을 높일 수 있는 최적의 예측진단 주기를 결정하였으며 Markov State Model을 정비계획 수립에 적용하므로 계획수립에 필요한 계산을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 시스템을 이루고 있는 각각의 설비별로 이러한 계획 수립과정이 필요 하므로 설비의 종류가 많고 복잡한 구조를 가진 전력설비에 적합하다. 따라서 본 논문에서 제안한 정비계획 수립방법은 예측정비계획을 적용하고자하는 설비의 정확한 수명 평가만 이루어진다면 유용하게 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] Rausand, "Reliability centered maintenance," Reliability Engineering and System Safety, vol. 60, pp. 121-132, 1998

[2] Wenjian Li and Hoang Pham, "An Inspection-Maintenance Model for Systems With Multiple Competing Processes," IEEE Trans. Reliability, vol. 54, No. 2, June 2005

[3] Antoine Grall, Laurence Dieulle, Christophe Bérenguer and Michel Roussignol, "Continuos-Time Predictive-Maintenance Scheduling for a Deteriorating System," IEEE Trans. Reliability, vol. 51, No. 2, June 2002

[4] M. Rausand and A. Høyland, System Reliability Theory, Wiley-Interscience 2004

[5] 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

[6] Suprasad V. Amari and Leland McLaughlin, "Optimal Design of a Condition-Based Maintenance Model," RAMS 2004

[7] Wenyuan Li, "Evaluating Mean Life of Power System Equipment with Limited End of Life Failure Data," IEEE Trans. Power System, Vol. 19, No. 1, pp. 236-242, Feb. 2004

[8] 이승혁, 신준석, 김진오, "Markov State Model을 이용한 복합화력 발전설비의 최적의 유지보수계획 수립," 전기학회 논문지, Vol. 56, No. 2, Feb. 2007

[9] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluating of Engineering System, Plenum Press, 1992

저 자 소 개



신 준 석 (辛 竣 碩)

1980년 5월 15일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 한양대학교 전기공학과 석사.
Tel : 02-2220-0347
E-mail : jsshin@hanyang.ac.kr



변 응 태 (卞 隆 泰)

1958년 6월 19일생. 2002년 서울산업대학교 전기공학과 졸업(학사). 2004년 한양대학교 전기공학과 석사. 2006년 한양대학교 전기공학과 공학박사 수료.
Tel : 02-2220-0347
E-mail : cielec7119@naver.com



김 진 오 (金 鎭 吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 1991년 12월 Texas A&M대학교 전기공학과 공학박사. 현재 한양대학교 전자전기공학부 정교수
Tel : 02-2220-0347
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr



김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월 30일생. 1991년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 2003년 8월 Texas A&M대학교 전기공학과 공학박사. 현재 한국철도 기술연구원 선임연구원
Tel : 031-460-5450
E-mail : hckim@krii.re.kr