

Markov State Model을 이용한 복합화력 발전설비의 최적의 유지보수계획 수립

論 文
56-2-4

Application Markov State Model for the RCM of Combustion Turbine Generating Unit

李 丞 懣* · 辛 竣 碩** · 金 鎮 吾†
(Seung-Hyuk Lee · Jun-Seok Shin · Jin-O Kim)

Abstract - Traditional time based preventive maintenance is used to constant maintenance interval for equipment life. In order to consider economic aspect for time based preventive maintenance, preventive maintenance is scheduled by RCM(Reliability-Centered Maintenance) evaluation. 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 a Markov model. In case study, simulation results about RCM are used to the real historical data of combustion turbine generating units in Korean power systems.

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

1. 서 론

전력시스템은 전력을 사용하고 있는 수요자들에게 안정적인 전력공급이 중요하다. 안정적인 전력 공급을 위해서는 여러 중요한 조건들이 있지만 그중에 전력시스템을 구성하고 있는 설비들이 안정적인 전력공급을 할 수 있는 상태를 유지시키기 위한 예방 유지보수계획수립이 필요하다.

현재 우리나라에서 전력설비에 적용하고 있는 기존의 일정한 시간간격으로 실행하는 시간기준 예방 유지보수계획(Time-Based Preventive Maintenance)은 일괄적인 유지보수 주기를 설비에 적용한다. 예를 들어 우리나라 복합화력 발전설비의 A급 유지보수 주기는 발전회사 마다 차이는 있지만 대략 35,000 시간에서 48,000 시간으로 이 주기에 따라 설비를 교체하는 유지보수를 실행하고 있다. 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.

본 논문에서는 RCM 계획 수립 방법에서 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov State Model을 이용하여 PM(Preventive Maintenance) 계획을 수립하는 방법을 제안하였다. 이러한 최적의 RCM 계획 수립 방법의 최근 연구로는

참고문헌 [1]의 노르웨이 수력발전 시스템 전체에 대해 Markov State Model을 적용하여 최적의 RCM 계획을 수립한 연구가 있다. 하지만 참고문헌 [1]은 수력발전설비 전체의 최적 유지보수계획을 수립하였기 때문에 각 발전설비의 유지보수 시기를 결정하기에는 적절하지 못한 적용이었다.

Markov State Model을 적용하기 위해서는 시스템의 성능이 저하되는 각각의 상태를 나누는 확률적 기준이 필요하다. 그러나 우리나라에는 이러한 기준이 없으므로 노르웨이의 EBL(Norwegian Electricity Industry Association)에서 시스템의 상태를 나누는 기준 [1]을 참고하였다. 기준에 따라 나누어진 각 상태를 감마분포(Gamma Distribution)와 지수분포(Exponential Distribution)로 정의하고 각각의 상태 사이에 존재하는 천이율(Transition Rate)을 계산하여 최적의 유지보수 계획 수립방법을 제시하였다.

사례연구에서 우리나라 복합화력 발전설비 1기에 대하여 본 논문에서 제안한 Markov State Model을 적용하여 최적의 유지보수 주기를 결정하였다

2. 시스템 상태의 구분

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

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

† 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

* 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 工學博士

** 學生會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2006年 11月 23日

最終完了 : 2006年 12月 8日

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

3. Markov State Model

표 1을 적용하여 Markov State Model를 사용하기 위해서 시스템의 상태를 그림 2로 나타내었다. 5개로 표현되어 있는 각각의 상태를 중요상태(Main State)라 하고, 본 논문에서는 k 번째 Main state를 Main state k 라 정의하였다.

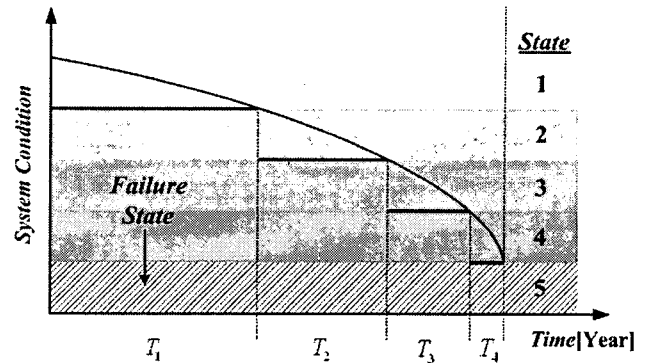


그림 2 시스템의 중요상태의 수준과 수명 곡선
Fig. 2 Technical levels for main condition and life curve

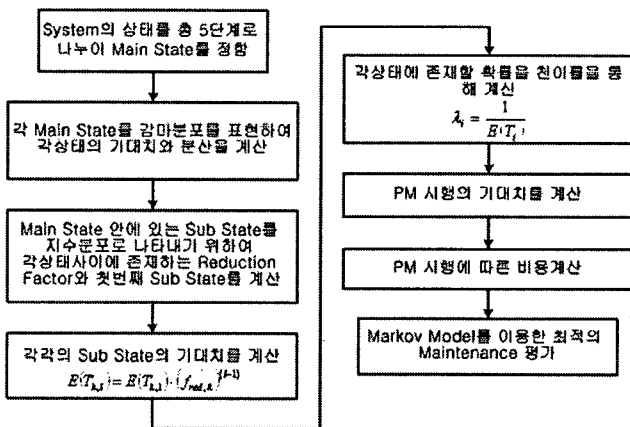


그림 1 Markov State Model을 이용한 RCM계획 수립과정
Fig. 1 RCM procedure using Markov state model

각각의 Main State k 의 길이를 나타내는 T_k 는 불확실성을 가지고 있으므로 확률분포(Probability Distribution)로 나타낼 필요성이 있다. 따라서 Main State k 를 감마분포로 표현하며 각 상태는 기대치(Expectation)와 분산(Variance)을 가지고 있고 T_k 는 Main State k 에 머무를 시간이 된다. 따라서 Main State k 에서 감마분포의 고장밀도함수(Failure Density Function)는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{1}{\alpha_k^\beta \Gamma(\beta_k)} \cdot t^{\beta_k-1} \cdot e^{-\frac{t}{\alpha_k}} \quad (1)$$

여기서, α_k : Main State k 에서의 척도모수(Scale Parameter)
 β_k : Main State k 에서의 형상모수(Shape Parameter)

그리고 β_k 와 α_k 는 관계는 식 (2), (3)과 같다.

$$\beta_k = E(T_k)^2 / Var(T_k) \quad (2)$$

$$E(T_k) = \alpha_k \beta_k \quad (3)$$

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

감마분포로 표현되는 Main State k 는 시스템의 상태를 더욱 세분화하여 표현하기 위해, L_k 개의 지수분포로 표현하였다. 여기서 L_k 는 Main State k 안에 존재하는 지수분포의 수이며, 전체 Main State의 모든 지수분포의 수, $l=1, 2, \dots, L_k$ 로 표현된다. 그리고 지수 분포는 Main State 안에 존재하는 Sub State라 정의된다. 감마분포는 지수분포의 합으로 표현되므로, Main State k 에서의 감마분포의 형상모수 β_k 와 L_k 는 식 (4)와 같은 관계가 성립한다.

$$L_k \geq \beta_k \quad L_k \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (4)$$

여기서, L_k : Main state k 안에 존재하는 지수분포의 수

지수분포의 기대치와 분산의 관계는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$Var(T_{k,l}) = E(T_{k,l})^2 \quad (5)$$

여기서, $E(T_{k,l})$: Main State k 에서의 l 번째 Sub State의 기대치
 $Var(T_{k,l})$: Main State k 에서의 l 번째 Sub State의 분산

지수분포로 표현되는 모든 Sub State가 확률적으로 독립이라면, $E(T_k)$ 와 $Var(T_k)$ 는 식 (6), (7)과 같이 표현된다.

$$E(T_k) = \sum_{l=1}^{L_k} E(T_{k,l}) \quad (6)$$

$$Var(T_k) = \sum_{l=1}^{L_k} Var(T_{k,l}) \quad (7)$$

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 (8)과 같다.

$$E(T_{k,l}) = f_{red,k} \cdot E(T_{k,l-1}) \quad (8)$$

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

첫 번째 Sub State의 기대치인 $E(T_{k,1})$ 을 이용하여 식 (8)을 표현하면 식 (9)와 같다.

$$E(T_{k,l}) = E(T_{k,1}) \cdot (f_{red,k})^{(l-1)} \quad (9)$$

또한, 식 (9)를 이용하여 $E(T_k)$ 를 나타내면 식 (10)과 같이 정의된다.

$$E(T_k) = E(T_{k,1}) \cdot \sum_{l=1}^{L_k} (f_{red,k})^{(l-1)} \quad (10)$$

그리고, T_k 의 분산은 식 (7)과 식 (10)을 이용하면 식 (11)과 같이 정리된다.

$$Var(T_k) = E(T_{k,1})^2 \cdot \sum_{l=1}^{L_k} [(f_{red,k})^{(l-1)}]^2 \quad (11)$$

결국, 감마분포의 형상모수 β_k 는 식 (2), (10)과 식 (11)을 통해 식 (12)와 같은 관계식으로 표현된다.

$$\beta_k = \frac{\left[\sum_{l=1}^{L_k} (f_{red,k})^{(l-1)} \right]^2}{\sum_{l=1}^{L_k} [(f_{red,k})^{(l-1)}]^2} \quad (12)$$

$E(T_{k,1})$ 과 $f_{red,k}$ 는 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다. 또한 Main State k 안에서의 첫 번째 Sub State를 i_k 라 정의하면 식 (13)과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} i_1 &= 1 \\ i_2 &= L_1 + 1 \\ i_3 &= L_1 + L_2 + 1 \\ i_4 &= L_1 + L_2 + L_3 + 1 \\ i_5 &= r \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 L_k : Main state k 안의 Sub state의 수
 r : 고장상태(Failure state)

따라서 고장상태(Failure state) r 은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$r = \sum_{k=1}^4 L_k + 1 \quad (14)$$

State i 에서 State $i+1$ 로 시스템의 상태가 변화할 천이율은 그림 3과 같이 λ_i 라 표현한다. PM을 실시할 기준(Maintenance Limit)을 m 으로 나타내면 시스템의 상태가

$i \geq m$ 일 때 PM을 실시하게 되며 CM은 시스템이 고장일 일킬 때 실시한다. PM과 CM은 완전하므로 실시한 후에 시스템의 상태는 '거의 새것과 같은 상태(as good as new)'로 가정한다.

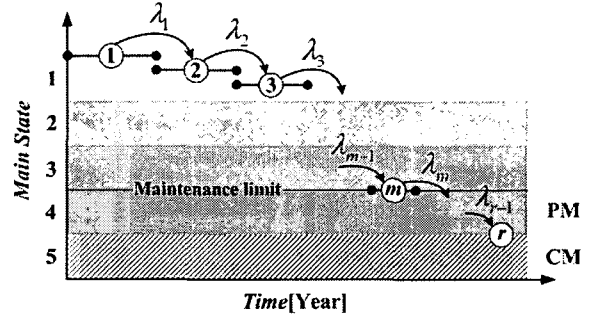


그림 3 Markov State Model을 이용한 유지보수 계획
 Fig. 3 Maintenance strategy in the Markov state model

시간 t 에서 시스템의 상태가 State i 에 있을 확률을 $P_i(t)$ 라 하면, Δt 시간 후에 시스템의 상태가 State i 에 있을 확률은 식 (15)와 같이 표현된다.

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t)(1 - \lambda_i \Delta t) + P_{i-1}(t)\lambda_{i-1} \Delta t \quad (15)$$

여기서, λ_i : 시스템의 상태가 $i+1$ 로 바뀔 천이율
 $(\lambda_i = 1/E(T_i))$

Δt : 임의의 작은 시간 변화

4. 유지보수 비용 계산

RCM 계획 수립 방법에 있어서 PM 계획을 수립한 후에는 소요되는 경제적 비용을 평가해야지만 정확한 PM 계획을 수립했는지 알 수 있다. 따라서 시스템 유지보수에 필요한 비용을 계산을 하면 식 (16)과 같다.

$$C_{tot} = \sum_y (C_{CM}E[n_{CM}(y)] + C_{PM}E[n_{PM}(y)]) \quad (16)$$

여기서, C_{CM} : CM 1회 필요한 비용

C_{PM} : PM 1회 필요한 비용

$E[n_{CM}(y)]$: y 년에 CM횟수의 기대치

$E[n_{PM}(y)]$: y 년에 PM횟수의 기대치

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 Markov State Model을 이용한 RCM 계획 수립 방법을 우리나라의 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.

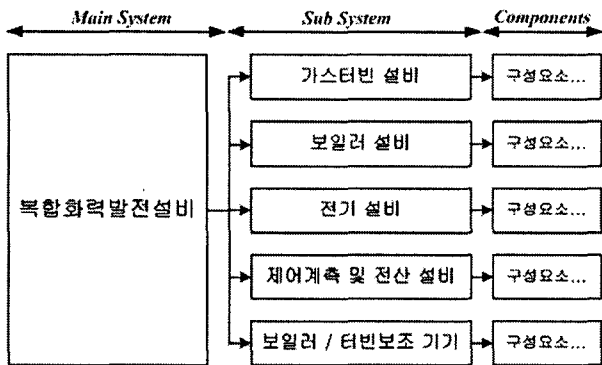


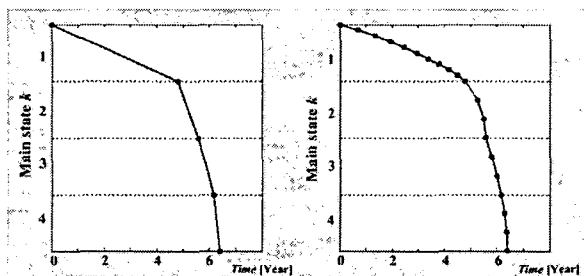
그림 4 복합화력 발전설비의 하위시스템 및 구성요소의 구분

Fig. 4 Decomposition level of system of combustion turbine generator

표 2 복합화력 발전설비의 각 하위시스템의 Main State에 대한 모델링

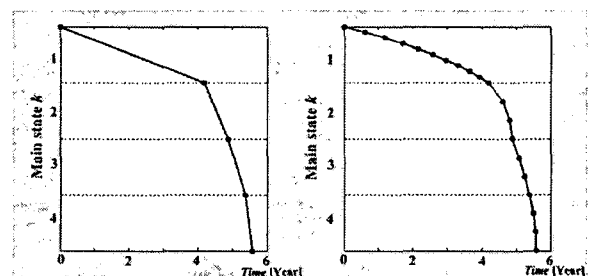
Table 2 Main state modeling for each sub-system (equipment) in combustion turbine generator

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 전산 설비	1	1.549
	2	0.258
	3	0.181
	4	0.077



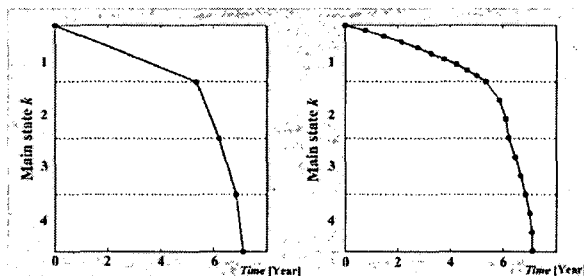
(a) (b)

가스 설비



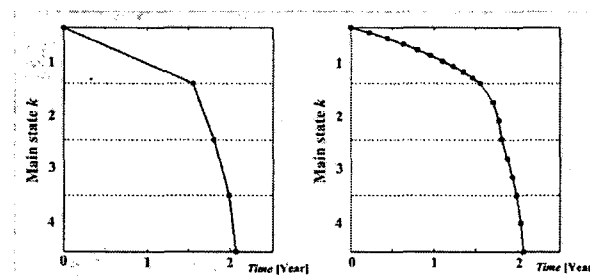
(a) (b)

보일러 설비



(a) (b)

전기 설비



(a) (b)

제어계측 및 전산 설비

그림 5 모든 하위시스템 (a) 각 Main State를 갖는 수명 곡선과 (b) 모든 Sub

Fig. 5 All sub-system (a) Life curve with main states and (b) all sub states

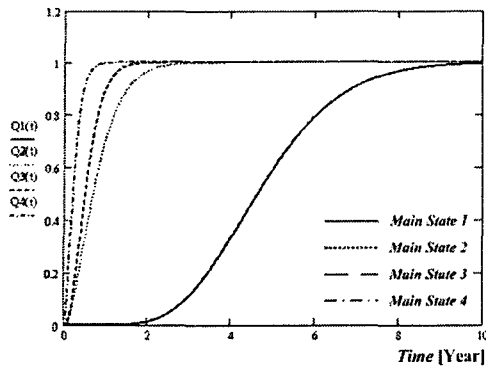
사례연구는 복합화력 발전설비의 하위 시스템에 적용을 하였으나 '보일러 / 터빈보조 기기'는 데이터 취득이 어려움에 따라 '가스터빈 설비', '보일러 설비', '전기 설비' 그리고 '제어계측 및 전산 설비'의 4가지에 Markov State Model을 적용하였다.

수집된 하위시스템의 수명을 고려하여 가정한 각 Main State의 기대치와 표준편차는 표 2와 같다.

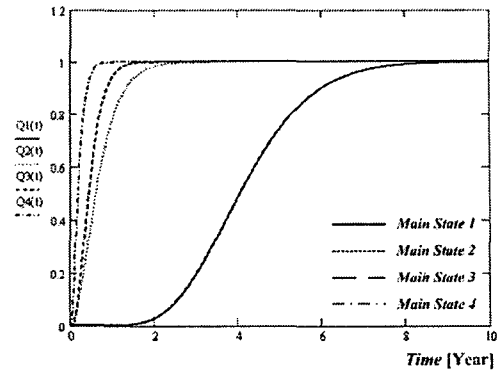
각 Main State의 기대치와 분산에 Markov State Model을 적용하여 표 3과 같이 모든 하위시스템의 $\alpha_k, \beta_k, f_{red,k}$ 와 $E(T_{k,1})$ 을 계산하였다.

또한 표 3을 이용하여 4개의 하위시스템의 Main State와 Sub State는 그림 5와 같다. 그리고 감마분포로 표현되는 4개 하위시스템의 각 Main State의 누적고장분포(CFD: Cumulative Failure Distribution) 함수를 그림 6에 나타내었다.

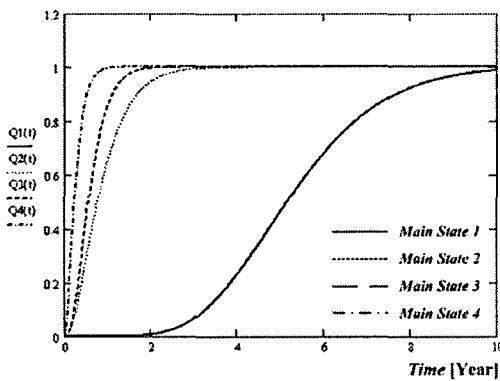
해당 관측년도에 수행할 PM 횟수의 기대치는 그림 7과 같다. 가스터빈 설비는 6.391년이 지나면 PM의 기대치가 0.1563으로 시간의 흐름을 고려하면 PM 발생 확률이 거의 1이 되어 예방유지보수를 실행하게 된다. 이와 같이 표 4에 하위시스템의 최적 PM주기와 소비비용을 나타내었다.



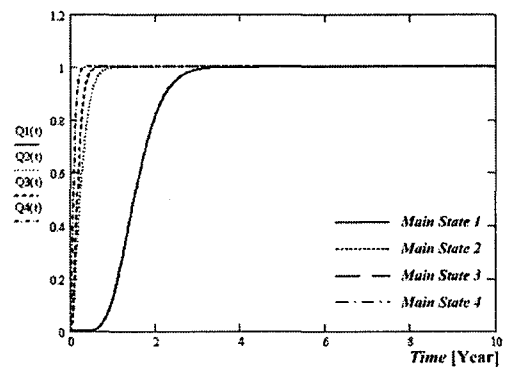
가스 설비



보일러 설비



전기 설비



제어계측 및 전산 설비

그림 6 모든 하위시스템의 각 Main State의 CFD

Fig. 6 Each CFD for all sub-system

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	α_k	β_k	$f_{red,k}$	$E(T_{k,1})$	
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

본 논문에서는 PM 수행에 대한 비용만 고려하였으므로, 그림 8은 그림 7의 기대치에 비용을 고려한 것이다.

표 4 하위시스템에 대하여 Markov State Model을 적용한 경우 최적의 RCM 결과

Table 4 Optimal RCM schedule for the each sub-system using Markov state model

	RCM 주기 [Year]	1회 PM 비용[원]
가스터빈 설비	6.391	12억
보일러 설비	5.583	8억
전기 설비	7.106	10억
제어계측 및 전산 설비	2.065	5억

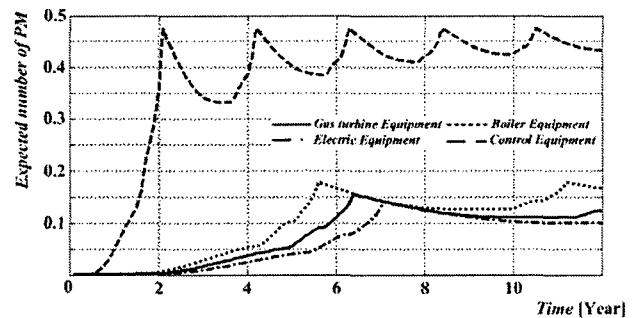


그림 7 각 하위시스템의 PM 발생확률의 기대치

Fig. 7 Development of the expected number of PM per year for each sub-system

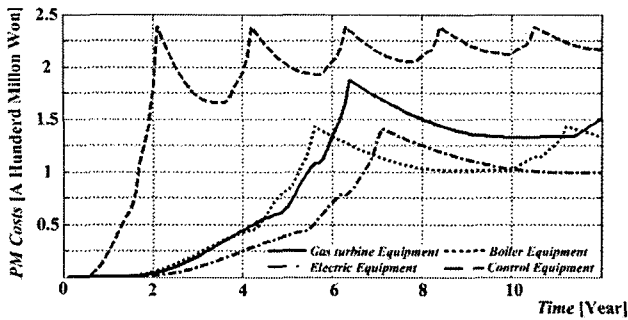


그림 8 각 하위시스템의 PM에 대한 기대되는 비용
Fig. 8 Expected cost for PM of each sub-system

복합화력 발전설비의 A급 유지보수 주기는 약 4.8 년 (42000 시간)이므로 제어계측 및 전산 설비를 제외한 나머지 설비는 일반적으로 4.8 년을 적용할 것이 아니라 설비의 수명에 따라 주기를 길게 하는 것이 경제적이라 할 수 있다. 그리고, 제어계측 및 전산 설비의 주기는 표 4에 따라 A급 유지보수 주기보다 약 0.5배 정도로 주기가 더 짧아진다. 하지만 A급 유지보수 주기 안에 수행할 B급, C급 유지보수에 들어갈 비용을 생각한다면 주기를 2.065 년으로 하는 것이 경제적이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 최적의 유지보수 계획 수립방법을 제안하기 위해 RCM 계획 수립 방법에서 임의의 확률적 상태를 고려한 Markov State Model을 이용하여 PM 계획을 수립하는 방법을 제안하였고 우리나라의 복합화력 발전설비에 Markov State Model을 사용하여 최적의 유지보수 주기를 결정하였다. 기존의 예방유지보수에 행해지던 보수 간격을 설비 수명을 고려한 주기로 더 길게 정할 수 있으므로, 이는 경제적인 이득을 가져올 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 Markov State Model을 이용한 PM 주기 결정방법은 시스템의 상태를 알기 위한 정기검사(Inspection)에 대해 고려하지 않았기 때문에 정기검사에 소요되는 비용이나 시스템의 상태를 안정적으로 유지할 검사의 주기 및 불완전한 PM과 CM을 고려하지 않았다. 따라서 향후 연구에서는 이와 같은 사항을 고려할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Ythomas M. Welte, Jørn Vatn and Jørn Heggset, "Markov State Model for Optimization of Maintenance and Renewal of Hydro Power Components," 9th PMAFS KTH, Stockholm, Sweden, 11-15 June, 2006
[2] A. Grall, L. Dieulle, C. Bérenguer and M. Roussignol, "Continuous time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system," *IEEE Trans. Reliability*, vol. 51, pp. 141-150, June 2002

[3] M. Rausand, "Reliability centered maintenance," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 60, pp. 121-132, 1998
[4] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluating of Engineering System*, Plenum Press, 1992
[5] M. J. Crowder, A. c. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, *Statistical Analysis of Reliability Data*, Chapman and Hall, 1991
[6] M. Rausand and A. Høyland, *System Reliability Theory*, Wiley-Interscience 2004

저 자 소 개



이 승 혁 (李 丞 熾)

1974년 8월 3일생. 2003년 한양대학교 전기공학과 석사. 2007년 동 대학원 전기공학과 공학박사.
Tel : 02-2220-0347
E-mail : leesh93@hanyang.ac.kr



신 준 석 (辛 竣 碩)

1980년 5월 15일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 한양대학교 전기공학과 석사과정.
Tel : 02-2220-0347
E-mail : jssshin@hanyang.ac.kr



김 진 오 (金 鎭 吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 1991년 12월 Texas A&M대학교 전기공학과 공학박사. 현재 한양대학교 전자전기공학부 교수.
Tel : 02-2220-0347
Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr