

Markov State Model을 이용한 복합화력 발전설비의 최적의 유지보수계획 수립

신준석, 이승혁, 김진오
한양대학교 전기공학과

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

Jun-Seok Shin, Seung-Hyuk Lee, Jin-O Kim
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

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.

1. 서론

기존의 일정한 시간간격으로 실행하는 시간기준 예방 유지보수 계획(Time Based Preventive Maintenance)에서 경제적인 측면을 고려하여 최적의 유지보수 계획을 수립하기 위하여 신뢰도라는 확률적인 이론을 접목한 유지보수 계획이 바로 신뢰도 기반 유지보수 계획이다(RCM: Reliability Centered Maintenance). 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 각 상태를 확률적 기준에 따라 나누고, 각 상태사이의 전이율(Transition Rate)을 계산하여 최적의 유지보수 계획 수립방법을 제시하였다. 사례연구에서 우리나라 복합화력 발전설비 1기에 대하여 Markov State Model을 적용한 최적의 유지보수 주기를 결정하였다.

2. 시스템 상태의 구분

RCM계획을 수립하는데 있어서 Markov Model을 적용하기 위해서는 시스템의 상태를 나누는 기준이 필요하다. 그러나 국내에는 시스템의 상태를 나누는 기준이 없으므로 노르웨이의 EBL(Norwegian Electricity Industry Association)에서 시스템의 상태를 4가지로 나누는 기준인 표 1을 적용하였다.

표. 1 기술적으로 중요한 상태(EBL 구분 기준)

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

표 1에서 4가지로 나눈 시스템 상태에 고장상태(Failure State)를 5번째 상태로 나타내어서 Markov Model을 적용하였다.

3. Markov State Model

표 1을 적용하여 Markov State Model을 사용하기 위해서 시스템의 상태를 그림 2로 나타내었다. 5개로 표현되어 있는 각각의 상태를 중요상태(Main State)라 하고 k번

째 Main state를 Main state k라 한다.

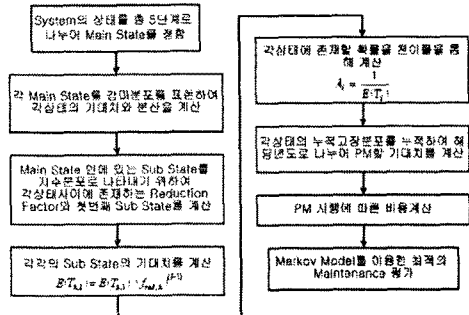


그림. 1 Markov State Model을 이용한 RCM계획 수립과정

각각의 Main State k의 길이를 나타내는 T_k는 불확실성을 가지고 있으므로 확률분포(Probability Distribution)로 나타낼 필요성이 있다. 따라서 Main State k를 감마분포(Gamma Distribution)로 표현하며 각 상태는 기대치(Expectation)와 분산(Variance)을 가지고 있고 T_k는 감마분포의 기대치가 된다.

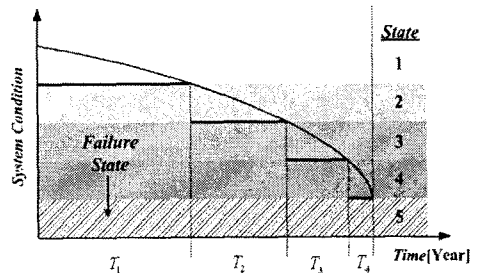


그림. 2 시스템의 중요상태의 수준과 수명 곡선

Main State k에서 감마분포의 고장밀도함수(Failure Density Function)는 식 (1)과 같다.

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

여기서, α_k : 척도모수, β_k : 형상모수

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 k는 시스템의 상태를 더욱 세분화하여 표현하기 위해 L_k개의 지수분포

(Exponential Distribution)로 표현한다. 여기서 L_k 는 Main State k 안에 존재하는 지수분포의 수이며 $l=1, 2, \dots, L_k$ 로 표현된다. 그리고 지수 분포는 Main State안에 존재하는 Sub State라 한다. 감마분포는 지수분포의 합으로 표현되므로 Main State k 에서의 감마분포의 형상모수 β_k 와 L_k 는 식 (4)와 같은 관계가 있다.

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

여기서, L_k : Main state k 안에 존재하는 지수분포의 수
지수분포의 기대치와 분산의 관계는 식 (5)와 같다.

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

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

지수분포로 표현되는 Sub State들이 각각 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 시스템의 상태는 수명이 다할수록 악화되는 속도가 빨라지므로 이러한 상황을 고려하기 위해 지수분포로 표현되는 현재 Sub State와 이전 Sub State의 기대치의 관계를 식 (8)과 같이 표현 한다.

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

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.

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

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

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

그리고 T_k 의 분산은 식 (5)와 식 (8)을 이용하면 식 (11)과 같다.

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

따라서, 감마분포의 형상모수 β_k 는 식 (2), (10)과 (11)을 통해 식 (12)와 같다.

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

$E(T_{k,i})$ 과 $f_{red,k}$ 를 식 (10)과 식 (12)를 사용하여 구하므로 Sub State를 표현할 수 있다.

State i 에서 State $i+1$ 로 시스템의 상태가 변화할 천이율은 그림 3과 같이 λ_i 라 표현한다. PM(Preventive Maintenance)을 실시할 기준(Maintenance Limit)을 m 으로 나타내면 시스템의 상태가 $i \geq m$ 일 때 PM을 실시하게 되며 CM은 시스템이 고장을 일으킬 때 실시한다. PM과 CM은 완전하므로 실시한 후에 시스템의 상태는 '거의 새것과 같은 상태(as good as new)'로 생각한다.

시간 t 에서 시스템의 상태가 State i 에 있을 확률을 $P_i(t)$ 라 하면 식 (13)과 같다.

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t)(1 - \lambda_i \Delta t) + P_{i-1}(t)\lambda_{i-1} \Delta t \quad (13)$$

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

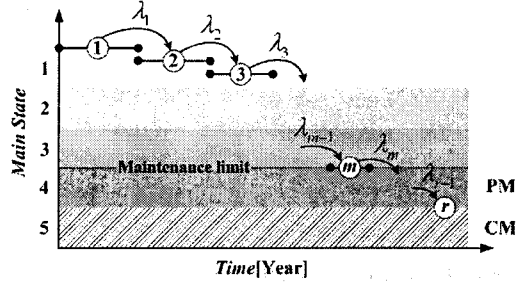


그림. 3 Markov State Model을 이용한 유지보수 계획

4. 유지보수 비용 계산

RCM 계획 수립 방법에 있어서 PM 계획을 수립한 후에는 소요되는 경제적 비용을 평가해야 한다. 따라서 시스템 운영에 필요한 비용을 계산하면 식 (14)과 같다.

$$C_{tot} = \sum_y (C_{CM}E[n_{CM}(y)] + C_{PM}E[n_{PM}(y)]) \quad (14)$$

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 RCM평가를 위해서는 시스템 및 하위시스템의 기능을 확인하고, 시스템 및 하위시스템의 구분 수준을 결정하여 기능별로 블록(Block)을 정하는 과정이 필요하다. 따라서 사례연구로 진행될 복합화력 발전설비에 위의 과정을 적용시키므로 그림 4와 같은 구성을 하였다.

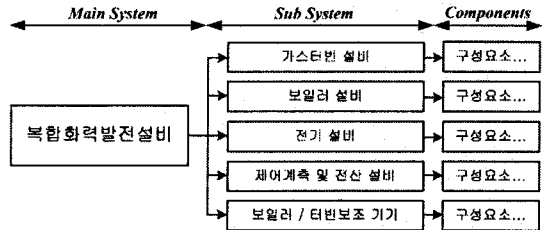


그림. 4 복합화력 발전설비의 하위시스템과 구성요소 구성도

표. 2 복합화력 발전설비의 각 Main State의 기대치와 표준편차

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

사레연구는 복합화력 발전설비의 하위 시스템에 적용을 하였으나 보일러 / 터빈보조 기기는 데이터 취득이 어려움에 따라 가스터빈 설비, 보일러 설비, 전기 설비 그리고 제어계측 및 전산 설비 이렇게 4가지에 Markov State Model을 적용하였다. 수집된 하위시스템의 수명을 고려하여 가정한 각 Main State의 기대치와 표준편차는 표 2와 같으며 각 Main State의 기대치와 분산을 Markov State Model을 적용하여 표 3과 같이 $\alpha_k, \beta_k, f_{red,k}$ 와 $E(T_{k,1})$ 를 계산하였다.

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

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

또한 표 3을 이용하여 그림 5의 가스터빈 설비의 Main State와 Sub State를 표현하였다. 그림 5와 같이 모든 하위 시스템의 Main State와 Sub State를 표현하였다.

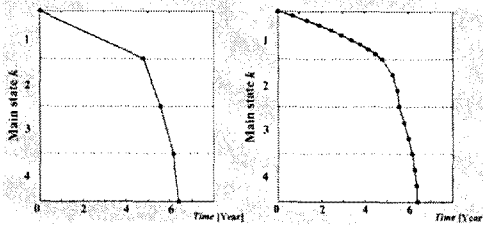


그림. 5 가스터빈 설비의 Main State의 수명곡선과 Sub State의 수명곡선

그리고 감분포로 표현되는 가스터빈 설비의 각 Main State의 누적고장분포(CFD: Cumulative Failure Distribution) 함수를 그림 6과 같이 표현하였다. 또한 그림 6과 같이 모든 하위 시스템의 누적고장분포 함수를 표현하였다.

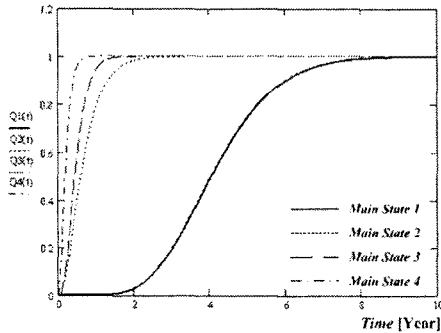


그림. 6 Main State의 CFD(가스터빈 설비)

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. 표 4에 하위

시스템의 최적 PM주기와 소요비용을 나타내었다.

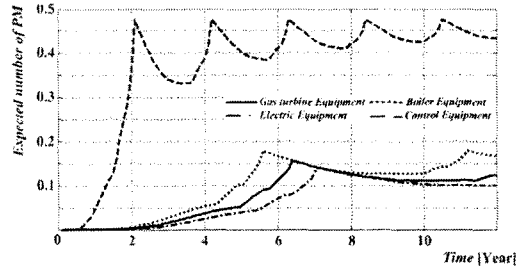


그림. 7 각 하위시스템의 PM 발생확률의 기대치

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

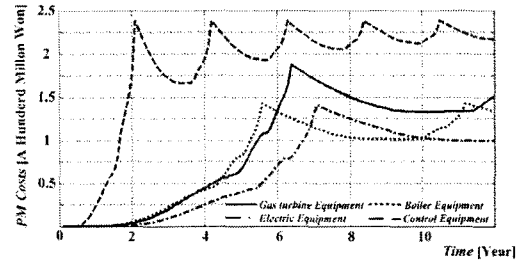


그림. 8 각 하위시스템의 PM에 대한 기대되는 비용

표. 4 하위시스템에 최적의 PM 주기와 소요비용

	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

복합화력 발전설비의 A급 유지보수 주기는 약 4.8년 (4200시간)이므로 제어계측 및 전산 설비를 제외한 나머지 설비는 일괄적으로 4.8년을 적용할 것이 아니라 설비의 수명에 따라 주기를 길게 가져가는 것이 경제적이라 할 수 있다. 그리고 제어계측 및 전산 설비의 주기는 표 4에 따라 A급 유지보수 주기보다 약 0.5배정도이다. 하지만 A급 유지보수 주기 안에 수행할 B급, C급 유지보수에 들어갈 비용을 생각한다면 주기를 2.065년으로 하는 것이 경제적이라 할 수 있다.

6. 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. 향후 연구 방향은 시스템의 상태를 알기위한 검사(Inspection)에 소요되는 비용과 불안전한 PM과 CM을 고려하여 최적의 유지보수 계획을 수립할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ythomas M. Welte, Jern Vatn and Jørn Heggset, "Markov State Model for Optimization of Maintenance and Renewal of Hydro Power Components," 9th PMAPS KTH, Stockholm, Sweden, 11-15 June, 2006
- [2] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluating of Engineering System*, Plenum Press, 1992
- [3] M. J. Crowder, A. c. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, *Statistical Analysis of Reliability Data*, Chapman and Hall, 1991
- [4] M. Rausand and A. Hoyland, *System Reliability Theory*, Wiley-Interscience 2004