

확률론적 FMECA를 이용한 발전설비의 신뢰도 기반 유지보수계획 수립

(Reliability-Centered Maintenance of Generating Unit Using Stochastic FMECA)

주재명 · 김동민 · 변용태 · 김진오* · 김형철

(Jae-Myung Joo · Dong-Min Kim · Yoong-Tae Byeon · Jin-O Kim · Hyung-Chul Kim)

요 약

본 논문은 신뢰도 기반 유지보수(RCM : Reliability-Centered Maintenance)계획에 의한 발전설비의 유지보수주기를 평가하고 있다. 유지보수주기는 발전설비의 안정성 및 비용을 결정하기 위한 기준으로 활용된다. 본 논문에서는 설비 수명평가를 통해 확률분포를 이용한 확률론적 FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)에 대해 논하고, 국내 발전설비중 비교적 평균수명이 짧은 복합화력 발전소를 선정하여 유지보수 주기를 평가하였다. 발전소 유지보수 평가는 향후 구조 개편된 전력시장에서 유지보수계획 수립 방법의 유용한 지표로 활용 가능할 것이다.

Abstract

Reliability-Centered Maintenance plan for maintenance schedule of generating unit is being assessed in this paper. Maintenance schedule is a key index that can be used to determine stability and cost. In this paper, stochastic FMECA is described for the life assessment by using probability distribution, and combustion-turbine generations in Korean power systems have been assessed for maintenance schedule. Such an assessment can be a useful guide for maintenance plans in restructured power industry

Key Words : RCM, FMECA, Failure Probability, IOC(Index of Criticality), MCS

1. 서 론

전력 산업에 시장 원리가 도입되는 구조개편으로 인하여 단일 송전사업자와 다수의 발전 사업자로 분할되는 체제로 변모하였다. 특히 발전분야의 사업자

입장에서는 경쟁적인 경영환경 변화 등으로 인하여 운전 및 유지보수 비용의 절감이 그 어느 때 보다 요구되고 있는 상황이다. 이에 발전설비에 대한 신뢰도 확보 및 경제성 향상을 위하여 불필요한 예방유지보수의 감축을 비롯하여 최적 유지보수 적용기법 개발이 요구되고 있다.

유지보수계획은 설비의 고장을 미리 예방하고자 행하는 예방유지보수(PM : Preventive Maintenance)와 고장이 발생했을 경우 보수를 행하는 고장정비(CM : Corrective Maintenance)로 구분되며, 여기서

* 교신저자 : 한양대학교 전기제어공학부 교수
Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2007년 6월 21일
1차심사 : 2007년 6월 25일
심사완료 : 2007년 10월 12일

예방유지보수는 설비 사용에 대해 일정 시간이 흐른 후 설비의 유지보수를 행하는 시간기준 유지보수(TBM : Time-based Maintenance)와 설비의 상태를 지속적으로 감시하여 이상이 발생했을 경우 유지보수를 행하는 상태기준 유지보수(CBM : Condition-based Maintenance)로 상세 구분된다[1].

현재 우리나라 발전소 유지보수계획은 대부분 TBM을 시행하고 있다. 이는 설비 성능의 중요성을 고려한다면 높은 신뢰성과 안정성 유지의 중요성은 자명하지만, 물리적으로 설비의 노후도와 과거 고장 이력을 고려하지 않고 일정 시간마다 유지보수를 시행하는 것은 근거가 부족하다.

본 논문에서는 신뢰도 기반 유지보수(RCM : Reliability Centered Maintenance)계획에 따라 유지보수계획을 수립하였고, 평가의 중요 단계인 FMECA(FMECA : Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) 평가에 대해 새로운 확률론적 평가 지수인 IOC(Index of Criticality)를 이용하는 간략화 된 방법을 제안하였고, 각 설비의 확률분포를 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션(MCS : Monte Carlo Simulation)을 이용해 복합화력 발전소의 유지보수주기를 결정하였다.

방법이며, 기존의 정비 프로그램을 최적화하기 위한 효과적인 도구로 사용된다[1-2].

RCM 분석을 위한 실행 절차는 그림 1과 같다. 물론 다음의 실행 절차는 RCM의 정식화된 절차는 아니며, 유지보수 운영자가 판단하여 실행 절차를 결정할 수 있다.

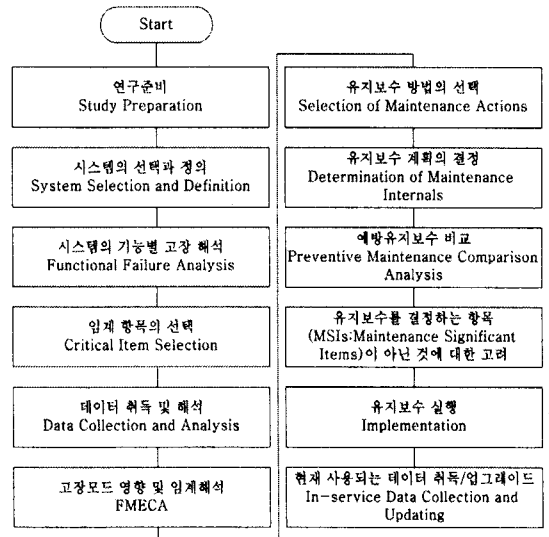


그림 1. 신뢰도 기반 유지보수 절차
Fig. 1. Procedure of RCM

2. 본 론

2.1 신뢰도 기반 유지보수계획

RCM은 PM프로그램을 개발하기 위한 체계적인

2.2 FMECA 평가

FMECA는 각 설비의 특성 및 영향을 고려하여 평가함으로써 CBM방법에 이용한다. 기존 FMECA 평

표 1. 기존 FMECA 평가지
Table 1. General FMECA worksheet format

식별기호 (Identification number)	Item or 기능명 (Item or Functional)	기능 (Function)	고장 형태/원인 (Failure Modes and Causes)	고장영향 (Failure Effects)			가혹도 (Severity Class)	고장예측 (Failure Predictability)	고 장 검지법 (Failure Detection)	기본정비 실 행 (Basic Maintenance Actions)	비고 (Remarks)
				부분영향 (Local Effects)	상위수준 영 향 (Next Higher Level)	최종종 영 향 (End Effects)					

표 2. 제안한 FMECA 평가지
Table 2. Proposed FMECA worksheet format

Item	Function	Failure Modes and Causes	Effects	Occurrence	Severity Class	Failure Probability	IOC (Ranking)

확률론적 FMECA를 이용한 발전설비의 신뢰도 기반 유지보수계획 수립

가는 평가하고자 하는 설비나 기기의 선행된 검사의 고장률이나 고장확률을 알고 있어야 설비에 대한 평가가 가능하다[3]. 만일 평가하고자 하는 설비의 고장확률이나 고장률을 모르는 경우는 평가자의 주관적 평가가 많이 개입될 수 있다는 큰 단점을 가지고 있다. 또한 우리나라의 전력계통설비는 특성상 선행된 검사의 고장률이나 고장확률에 대한 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 기존 FMECA 평가 방법을 사용하여 우리나라의 전력계통설비에 적용하기는 어려움이 많기 때문에 새로운 확률론적 평가 지수인 IOC를 이용하는 간략화된 방법을 제안하여 우리나라 실정에 맞는 FMECA 평가를 제안하고자 한다. 표 1과 2는 각각 기존 FMECA 평가지와 본 논문에서 제안하고자 하는 FMECA의 평가지를 나타내고 있다[3].

제안한 FMECA는 관측시점 t 에 대한 새로운 유지보수의 임계정도를 나타내는 IOC로 표현할 수 있으며 식 (1)처럼 정의할 수 있다.

$$IOC_i(t) = Q_i(t) \times Severity\ Class \quad (1)$$

여기서 $Q_i(t)$ 는 누적분포함수로서 고장확률을 나타내고 있으며, 그림 2의 절차에 의해 구하였다 [4-6].

여기서 Weibull 분포를 이용한 이유는 모수추정에 있어서 복잡성을 갖는다는 단점을 지니지만, 정확한 평균수명 예측과 수학적으로 함수가 유연성을 갖는 장점을 가지고 있기 때문이다.

Severity Class는 임계수준을 나타내고 있는 것으로서 다음 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$Severity\ Class = 1 + (F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5) \quad (2)$$

여기서 각 F_i 의 평점은 표 3의 평점표를 이용하여 구할 수 있으며, 여기서 평점표는 미국 자동차협회(SAE)의 SAE-ARP-5580을 참고하여 평가 하고자 하는 설비에 맞게 계수를 정하였다. 고장등급표의 항목에 1을 더한 것은 수명을 고려한 고장확률에 가중치의 개념으로 임계수준을 정해 IOC 지수를 결정하기 위함이다.

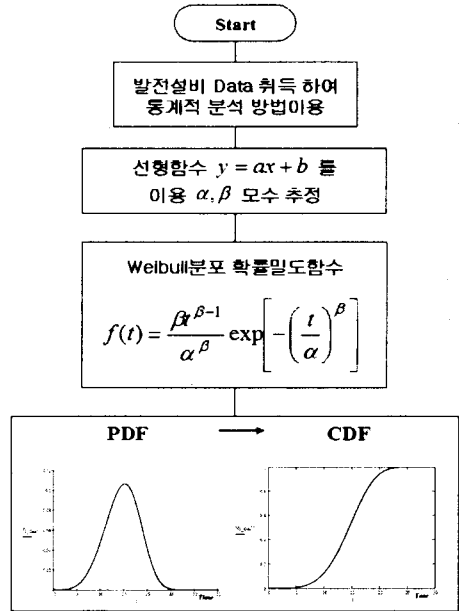


그림 2. 고장확률 계산 순서
Fig. 2. Calculation for failure probability

표 3. 고장 영향 크기에 따른 평점
Table 3. Proposed score according to failure effect

항 목	내 용	계수
F1 (고장 영향의 크기)	- 치명적인 손실을 주는 고장	1.0
	- 약간의 손실을 주는 고장	0.7
	- 기능이 상실되는 고장	0.4
	- 기능이 상실 안 되는 고장	0.1
F2 (시스템에 미치는 영향의 정도)	- 시스템에 2가지 이상의 중대한 영향을 준다.	1.0
	- 시스템에 한 가지 이상의 중대한 영향을 준다.	0.7
	- 시스템에 미치는 영향은 그렇게 크지 않다.	0.5
F3 (발생빈도)	- 발생빈도가 높다.	1.0
	- 발생 가능성이 있다.	0.7
	- 발생 가능성이 적다.	0.5
F4 (방지의 가능성)	- 불능	1.0
	- 방지가능	0.7
	- 간단히 방지된다	0.5
F5 (신규설계 여부)	- 약간 변경된 설계	1.0
	- 유사한 설계	0.7
	- 동일한 설계	0.5

2.3 확률론적 FMECA를 고려한 유지보수 계획

IOC 지수를 통해 각 설비의 FMECA를 평가하였다. 그 다음 단계는 복합화력 발전소 하나의 시스템에 대해 유지보수 계획을 수립해야 한다. 각 하위시스템의 확률밀도함수를 하나의 시스템으로 고려하기 위해 확률론적 접근 방법인 몬테카를로 시뮬레이션(MCS : Monte Carlo Simulation)을 이용하였다. 그림 4는 MCS를 이용하여 복합화력 발전소의 유지보수계획을 수립하기 위한 개념도를 표현하고 있다.

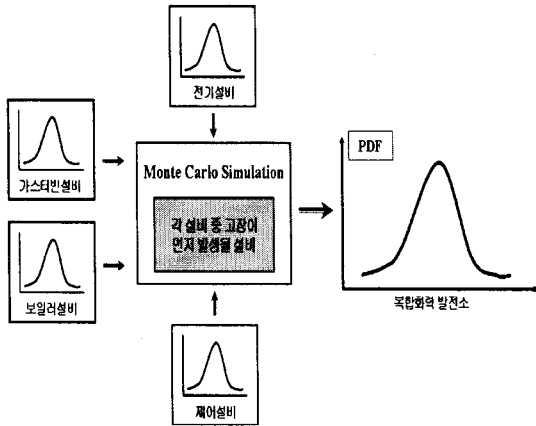


그림 4. MCS를 적용하기 위한 과정
Fig. 4. Process for MCS

MCS를 적용하기 위해 복합화력 발전소의 운영 특성을 고려해야 한다. 즉 각 하위시스템의 설비중 한 가지만 고장이 발생해도 복합화력 발전소는 고장이 발생하기 때문에 이를 고려하여 유지보수계획을 수립해야 한다. 물론 설비 한 가지가 고장 발생했다고 하여 무조건 복합화력 발전소가 고장나는 건 아니지만 본 논문에서는 설비중 한 가지만 고장 발생하여도 복합화력 발전소가 고장 발생한다고 가정하여 복합화력 발전소의 안전성을 고려하였다. 아래 그림 5는 확률밀도함수로부터 얻은 누적고장분포로서 각 설비별로 고장확률이 다른 것을 보여주고 있다. 그림 5에서 제어설비는 어떤 시점에서 관측하더라도 고장확률값은 다른 설비보다 고장확률이 높은

것을 볼 수 있다. 때문에 복합화력 발전소의 유지보수시 이러한 발전설비(제어설비)를 가장 먼저 고려해야 한다.

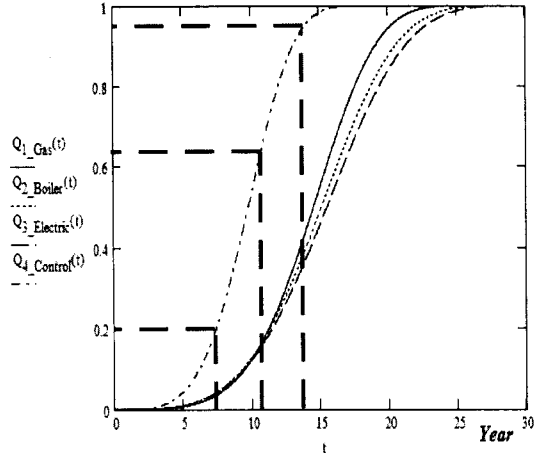


그림 5. 각 설비의 다른 고장확률
Fig. 5. Different failure probability of each equipment

2.4 사례연구

사례연구에서는 앞서 기술한 확률론적 IOC를 이용하여 FMECA 평가를 통해 RCM 계획을 수립하였으며, 현재 우리나라 전력계통의 발전설비 중 비교적 수명이 짧은 복합화력 발전설비에 대해 적용하였다.

임의의 발전회사 복합화력 발전소 #1을 고려하였으며, 복합화력 발전소#1은 1992년 6월에 설치된 후 기존의 PM 계획에 의해 4.8년만인 1997년 3월에 A급 유지보수를 실행하였고, 그 다음 유지보수는 2002년 2월에 실행하였다. 본 논문에서는 취득된 데이터가 2003년 6월까지의 데이터이므로, 2002년 4월 이후 A급 유지보수를 실행하지 않은 것으로 가정하고 FMECA를 평가하였다. 결국 평가할 기간은 2002년 4월부터 관측시점인 2006년 2월까지의 3.917년이라는 기간이 되며, 다음 그림 6에 이를 표현하였다.

위험론적 FMECA를 이용한 발전설비의 신뢰도 기반 유지보수계획 수립

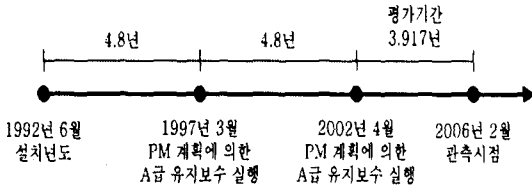


그림 6. FMECA 평가를 위한 timetable
Fig. 6. The timetable for FMECA assessment

복합화력 발전소 #1은 그림 7과 같이 분류하여 평가하였다.

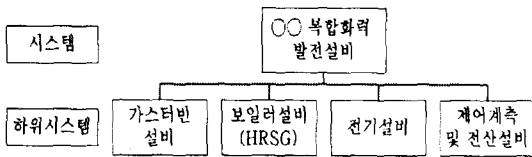


그림 7. 복합화력발전기의 하위시스템의 구분
Fig. 7. Decomposition level of sub-system of combustion turbine generation unit

각 하위시스템의 노화고장(Aging Failure)과 예측하지 못한 고장에 의한 고장을 고려하였으며, 각 하위시스템의 노화고장확률은 데이터 존재가 불투명하여 제작사의 명시된 권고 사용 수명을 최대한 반영하였다. 취득된 데이터를 가지고 Data Analytic Method를 이용하여 Weibull 분포 함수를 위해 각 하위시스템의 모수를 추정 하였으며, 그림 8은 모수

를 추정하기 위한 일차함수 회귀를 나타내고 있다 [5-6].

선형회귀 시킨 후 각 하위시스템의 척도모수와 형상모수를 정리하여 표 4에 나타내었다.

표 4. 각 하위시스템의 척도모수 및 형상모수
Table 4. Scale and shape parameters of each sub-system

No	Sub-system	α	β
1	가스터빈 설비	16.0771	4.5166
2	보일러 설비	16.6632	3.9319
3	전기설비	17.3402	3.8691
4	제어계측 설비	10.9381	4.2239

표 5는 각 하위시스템을 본 논문에서 제안한 FMECA 평가를 이용하여 나타내고 있다. 표 5에서 관측시점에서의 고장확률이 보일러 설비가 전기 설비보다 높게 나왔으나, Severity Class에 의해 IOC 지수는 보일러 설비보다 전기설비가 높은 것으로 나타났다. 이는 운영자가 판단하여 관측시점에서 유지보수를 할 경우 보일러 설비보다 전기 설비를 우선시하여 유지보수해야 함을 의미한다. 또한 Severity class는 표 3을 이용하여 가스터빈 설비에 대한 고장 등급 평가의 각 항목 값은 $F_1=1.0$, $F_2=1.0$, $F_3=0.7$, $F_4=0.7$, $F_5=0.5$ 로 결정하였다. 물론 각 항목의 값은 평가자의 주관적인 면

표 5. 각 하위시스템의 FMECA 평가지
Table 5. FMECA worksheet format of each sub-system

Item	Function	Failure Modes and Causes	Effects	Occurrence	Severity Class	Failure Probability	IOC (Ranking)
가스터빈 설비	가스와 공기를 이용하여 가스터빈구동	발전기가 정출력을 내지 못하고 열에너지 공급중단	발전력 및 난방, 온수 공급중단	1	1.245	0.00169 (4)	0.00249 (4)
보일러 설비	열에너지를 수용가에 공급	수용가에 열에너지(난방, 온수공급)원을 공급하지 못함	난방/온수 공급불가	-	1.061	0.00336 (2)	0.00375 (3)
전기설비	발전기로 인해 전기에너지를 발생	수용가에 전기에너지를 공급하지 못함	전력공급 불가	3	1.172	0.00315 (3)	0.00420 (2)
제어계측 및 전산설비	설비들의 출력 상태를 감시하거나 제어	전력이나 열에너지 공급의 적절한 제어가 되지 않으며, 현재시스템 상태를 알 수 없음	제어상실 및 감시불능	-	1.120	0.01298 (1)	0.01737 (1)

이 내포되지만 기존 FMECA평가처럼 평가 전반적인 부분에 주관적 부분이 포함되지는 않는다.

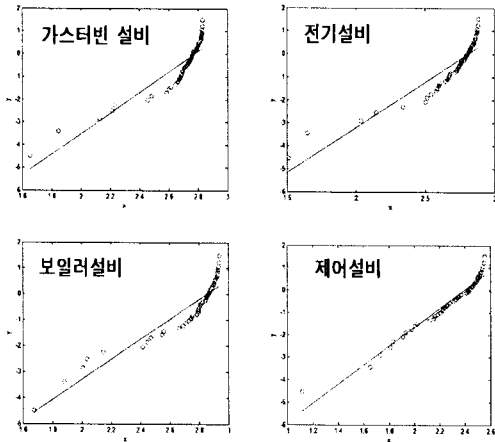


그림 8. 선형회귀를 이용한 Weibull분포의 모수추정
 Fig. 8. Estimation for the shape and scale parameters Weibull distribution using linear regression

하지 않은 경우를 평가했다. 그림 9는 각 하위시스템의 원래 고장밀도함수에 가중치가 적용된 고장밀도함수를 보여주고 있다. 여기서 점선으로 표현된 확률분포가 가중치가 적용된 경우이다.

가중치를 고려하지 않은 경우의 각 설비의 고장밀도함수를 이용하여 복합화력 발전소 #1의 MCS 결과를 그림 10에 나타내었다.

MCS결과 복합화력 발전소 #1의 평균 수명은 9.56년으로 평가되었다. 하지만 현재 복합화력 발전소를 운영할 경우 각 설비의 평균 수명이 다 할 때까지 사용하는 것이 아니라 안정적 운영을 위해 사용 수명을 결정한다. 즉 A급(전 설비 점검) 유지보수시 설비 수명이 다하지 않더라도 설비수명을 Zero로 하기 위해 설비를 교체한다. 현재 복합화력 발전소 #1의 유지보수 주기는 4.8년을 A급 유지보수주기로 사용하고 있다. 이는 MCS 결과로 얻은 평균 수명 9.56년의 거의 50[%]에 해당하는 값으로 현재 적용하고 있는 복합화력 발전소 #1의 유지보수 주기는 과도하게 안정적인 운영임을 확인할 수 있다.

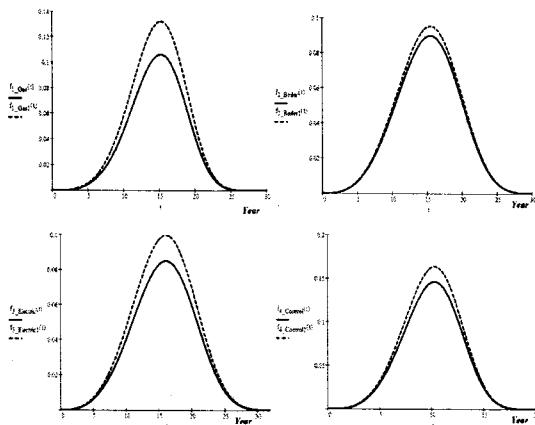


그림 9. 각 설비의 가중치를 고려한 고장밀도함수
 Fig. 9. Failure density function for sub-system equipment considered weighted factor

2.3절에서 언급하였듯이 각 하위시스템의 고장밀도함수를 고려하여 복합화력 발전소 #1의 유지보수 계획을 수립하였다. 유지보수계획을 수립하기에 앞서 고장밀도함수에 가중치(Weighted Factor 혹은 Severity Class)를 고려하였다. 또한 가중치를 적용

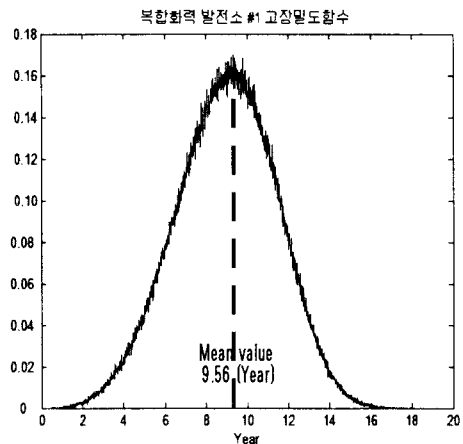


그림 10. 가중치 고려하지 않은 복합화력 발전소 #1의 고장밀도함수
 Fig. 10. Failure density function of cogenerator #1 considered without weighted factor

다음 평가로 고장밀도함수에 가중치가 적용된 경우를 고려하여 복합화력 발전소#1의 MCS 결과를 그림 11에 나타내었다

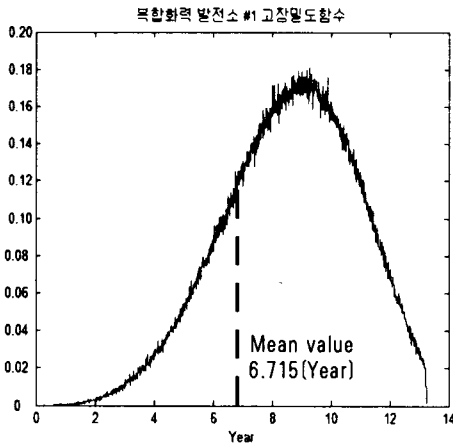


그림 11. 가중치 고려한 복합화력 발전소 #1의 고장밀도함수
 Fig. 11. Failure density function of cogenerator #1 considered weighted factor

가중치를 고려한 복합화력 발전소 #1의 평균수명은 6.715년으로 평가되었다. 이는 각 설비수명에 가중치를 적용한 값으로 가중치를 고려하지 않은 평균수명보다 평균수명이 짧게 나온 것은 자명한 결과이다. 설비의 기능과 특징을 고려하여 가중치를 적용해 얻은 평균수명 또한 기존 유지보수의 주기인 4.8년 보다 평균수명이 길게 나왔다. 여기서 주목할 점은 MCS 결과인 6.715년 또한 다른 설비에 비해 비교적 수명이 짧은 제어 설비로 인해 평균수명이 짧게 선정된 값이다. 이를 고려한다면 현재 복합화력 발전소 #1의 TBM기반 유지보수계획은 더욱더 그 근거가 미흡하다 할 수 있다. 지금까지의 결과를 아래 표 6에 정리하였다.

표 6. 복합화력 발전소 #1의 MCS 결과
 Table 6. Result of MCS for cogenerator #1

구 분	복합화력 발전소#1 평균수명	기존 유지보수 (TBM)
가중치 (○)	9.56년	4.8년
가중치 (×)	6.715년	4.8년

결과적으로 기존 유지보수 방법인 TBM은 과도한 안정성 확보로 인하여 현 경쟁체제의 전력구조에 맞지 않은 유지보수 방법임을 알 수 있다. 현재 각 발전소에서 이를 인지하여 CBM 유지보수 방법을 시행 중이거나 연구 중이다. 하지만 발전소 설비의 복잡성과 각 설비별 수명이 다르기 때문에 CBM 방법의 시행에 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법이 유지보수시 시행될 수 있는 여러 방법 중 한 가지 방법이 될 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 설비 상태를 지속적으로 감시하여 이상이 발생했을 경우 유지보수를 행하는 상태기준 유지보수(CBM : Condition-based Maintenance)를 시행하였으며, 기존유지보수 방법인 시간기준 유지보수(TBM : Time-based Maintenance)와 비교 평가했다.

RCM을 우리나라 복합화력 발전설비 실정에 맞게 적용하기 위해 고장모드 분석 및 임계해석(FMECA : Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) 평가 방법을 제안하였으며, Weibull 분포의 모수를 추정하기 위해 통계적 분석 방법을 이용하였다.

제안한 RCM 계획 수립 방법은 가용할 수 있는 발전설비를 더 사용함으로써 기존 일괄적으로 교체했던 설비보다 경제적으로 이득을 얻을 수 있는 것은 자명한 일이며, 이는 향후 구조개편 된 전력시장에서 아주 유용한 유지보수계획 수립 방법이 될 것으로 사료된다.

향후 연구방향으로는 유지보수 비용을 고려한 최적의 신뢰도기반 유지보수 계획을 수립하는 방법을 제안할 것이다.

감사의 글

본 연구는 '한국철도기술연구원'에서 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다.

References

- [1] John Moubray, Reliability-Centred Maintenance, Butterworth-Heinemann, Oxford, Reprint 1995.A.
- [2] Marvin Rausand, "Reliability Centered Maintenance," Reliability Engineering and System Safety, No. 60, pp. 121-132, 1998.
- [3] ML-STD 1629A, Reliability-Centered Maintenance, US Department of Defense, Washington DC 20301.
- [4] 이성훈, 이승혁, 김진오, "통계적 분석방법을 이용한 복합화력 발전설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측," 전기학회 논문지, 제 54A권, 제 10호, pp. 480-486, 2005, 10.
- [5] R. Rillinton and R. N. Allan, Reliability Evaluating of Engineering System, Plenum Press, 1992.
- [6] M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, Statistical Analysis of Reliability Data, Chapman and Hall, 1991.
- [7] Cheng Yun, T. S. Chung, C. W. Yu, C. Y. Chung, Zeng Ming, and Sun Xin, "Application of Reliability-Centered Stochastic Approach and FMECA to Conditional Maintenance of Electric Power Plants in China," IEEE International Conference on Electric DRPT, April 2004.

◇ 저자소개 ◇

주재명 (朱宰明)

2005년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2007년 8월 한양대학교 전기공학과 졸업(석사)

김동민 (金東珉)

2004년 2월 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2005년 ~ 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

변용태 (卞隆泰)

2004년 8월 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2005년 ~ 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

김진오 (金鎭吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기제어공학부 교수.

김형철 (金炯徹)

1991년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 8월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 2004년 ~ 현재 철도기술연구원 선임연구원.