

발전기 구성요소의 신뢰도 모델 조합을 이용한 고장확률 예측

이성훈·변용태·김진오
 *한양대학교 전기공학과

Failure Prediction of the Generator Using a Combined Reliability Model of its Individual Components

Sung-Hoon Lee-Yoong-Tae ByunJin-O Kim
 Dept. Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents a methodology to predict a failure probability related to the aging generating units in Korea power system. Each generator is represented by a combined reliability model of its individual components, which is determined by failure data. The Weibull distribution is used to calculate failure probability and its parameters are obtained from Type II Censoring.

Consequently, the proposed methods would likely to permit utilities to reduce overall costs in the new deregulated environment.

1. 서 론

전력시장이 개방되고 경쟁적 환경이 조성됨에 따라 계통운영의 합리화에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구를 해결하기 위해 시도되는 여러 방법들 중에서 전력계통 설비의 고장확률예측은 사고에 빠르게 대처하여 계통을 효율적으로 운영할 수 있게 한다 [1].

본 논문에서는 전력계통 설비 중 복합화력 발전설비의 고장확률을 예측하였다. 고장실적을 바탕으로 복합화력 발전기를 크게 다음과 같이 5가지 구성요소로 나누었다.

- 제어장비
- 발전기 계전기
- 가스터빈 압축기
- 배기가스 덕트
- 냉각수 펌프

각 구성요소의 고장실적을 바탕으로 각 각의 확률분포 함수를 구하였고, 신뢰도 이론에 따라 각 구성요소는 연속적(Series)으로 연결된 하나의 시스템으로 구현하였다. 확률분포 함수는 수명관리에 대한 신뢰도 평가에서 가장 많이 쓰이는 Weibull 확률분포를 사용하여 고장이 발생하지 않은 설비에 대한 생존확률을 고려하여 설비의 고장확률을 예측하였다. Weibull 확률분포는 형태 모수(Shape Parameter)와 척도 모수(Scale Parameter)를 가지고 있다. 각 모수는 빠르고 비교적 정확한 모수 추정이 가능한 통계적 분석방법(Type II Censoring)을 이용하여 추정하였고 추정된 모수를 바탕으로 조건부 확률을 고려하여 설비의 고장확률을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 Weibull 확률분포

Weibull 확률분포는 분포함수의 모수 값에 따라 다양한 모양을 나타낼 수 있으며, Weibull 분포의 확률밀도 함수는 식 (1)과 같이 정의 된다 [2].

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (1)$$

여기서, $t \geq 0, \beta > 0$ 이고 $\alpha > 0$ 이다.

또 한, 생존확률함수와 고장확률함수는 각 각 식 (2), (3)과 같다.

$$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (2)$$

$$Q(t) = [1 - R(t)] \quad (3)$$

2.2 Type II Censoring

Weibull 확률분포는 형태모수와 척도모수를 가지고 있으며, 각 모수는 통계적 분석법(Type II Censoring)을 이용하여 추정하였다 [3,4].

경험적 생존함수(Empirical Survivor Function : $\hat{S}(t)$)를 확률공간에 사상시켜 각 모수를 추정할 수 있으며, 경험적 생존함수 $\hat{S}(t)$ 는 시간 t 에 대하여 다음과 같은 시간적 흐름의 $t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_n$ 순서로 확률공간에 점을 찍을 수 있으며, 확률공간상에 $\hat{S}(t_{(i)})$ 의 계적을 살펴보면 다음 식 (4)와 같다 [4].

$$\hat{S}(t_{(i)}) = 1 - \frac{(i-1)}{n} \quad (4)$$

$$\hat{S}(t_{(i)}+0) = 1 - \frac{(i-1)}{n} - \frac{1}{n} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\hat{S}(t_{(i)}+0)$ 는 $\hat{S}(t_{(i)})$ 의 다음 이동위치를 의미한다. 경험적 생존함수 $\hat{S}(t)$ 는 확률공간상에 $(t_{(i)}, 1-p_i)$ 의 위치로 나타낼 수 있으며, p_i 를 타점위치(Plotting Position)이라고 한다. 식 (6)에 의해서 p_i 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{2} \{ \hat{s}(t_{(i)}) + \hat{s}(t_i+0) \} = 1 - \frac{(i-1)}{n} - \frac{1}{2n} \quad (6)$$

$$= 1 - \frac{(i-1/2)}{n}$$

$$p_i = \frac{i-1/2}{n} \quad (7)$$

그러므로 경험적 생존함수 \hat{S} 의 확률공간상 위치는 식 (8)과 같다.

$$(x, y) = (t_{(i)}, 1 - \frac{(i-1/2)}{n}) \quad (8)$$

Weibull 확률분포의 생존함수 식 (2)의 양변에 log를 취하면 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\log\{-\log S(t)\} = \beta \log t - \beta \log a \quad (9)$$

따라서 식 (8)과 (9)에 의해서 Weibull 확률분포의 생존함수는 $\log t_{(i)}$ 와 $\log\{1 - \log[1 - (i - 1/2)/n]\}$ 으로 나타나는 선형함수가 된다. 이 선형함수의 기울기와 절편을 각각 a, b 라고 하면 형태 모수(Shape parameter) $\beta = a$ 이고, 척도 모수(Scale parameter) $\alpha = \exp(-b/a)$ 가 된다.

2.3 조건부 확률(Conditional Probability)

고장확률 계산을 위해 앞서 언급한 Weibull 확률분포의 누적 고장확률함수 $Q(t)$ 를 이용하였고 식 (10)과 같다.

$$Q_{j,i}(t_0) = \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t - \tau_i)\right)\right)^{\beta_i} \quad (10)$$

여기서, $\alpha_i > 0, \beta_i > 0, (t - \tau_i) \geq 0, 0 \leq Q_i(t) \leq 1$ 이고
 t : 관측년도
 τ_i : 설치년도
 $t_0 = (t - \tau_i)$: 설비수명
 j : 구성요소(Component type)

고장확률은 식 (10)과 조건부 확률은 현재 시간 t_0 와 다음 시간 t_0 에서 고장이 발생할 확률로 정의되며, 조건부 확률 이론에 따라 고장확률함수 식 (10)을 고려하면 조건부 확률함수를 식 (11)와 같이 표현할 수 있다.

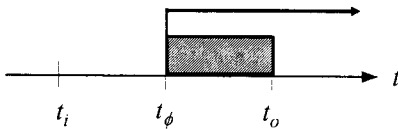


그림 1. 조건부 확률을 위한 고장 관측 시간

$$Q_{j,i}(t_0, t_0) = \frac{Q_{j,i}(t_0) - Q_{j,i}(t_0)}{1 - Q_{j,i}(t_0)} \quad (11)$$

식 (11)의 분자와 분모는 식 (12), 식 (13)과 같다.

$$Q_{j,i}(t_0) = \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t_0 - \tau_i)\right)\right)^{\beta_i} \quad (12)$$

$$Q_{j,i}(t_0) = \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t_0 - \tau_i)\right)\right)^{\beta_i} \quad (13)$$

여기서, $\alpha_i > 0, \beta_i > 0, t_0 > t_0, t_0 > \tau_i$ 이다.

2.4 신뢰도 모델

앞서 언급하였듯이 고장실적을 바탕으로 복합화력 발전기를 5가지 구성요소로 구분하였다. 각 구성요소는 확률분포를 가지며, 신뢰도 이론에 따라 각 구성요소는 연속적(Series)으로 연결된 하나의 시스템으로 볼 수 있다. 연속적으로 연결된 하나의 시스템은 다음 그림 2와 같이 직렬(Series) 시스템으로 나타낼 수 있으며 다음 식(14)를 만족한다.

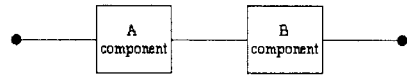


그림 2. 직렬(Series) 신뢰도 모델

$$Q_S = 1 - R_A \cdot R_B = 1 - (1 - Q_A)(1 - Q_B) \quad (14)$$

N 개의 구성요소를 직렬시스템으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_S = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (15)$$

따라서, 5가지 구성요소로 나눈 복합화력 발전기의 직렬시스템의 고장확률은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_S(t_0) = 1 - \prod_{j=1}^{m-n} (1 - Q_{j,i}(t_0, t_0)) \quad (16)$$

$$Q_S(t_0) = 1 - \left[\prod_{i=1}^{1n} (1 - Q_{1,i}(t_0, t_0)) \right] \left[\prod_{i=1}^{2n} (1 - Q_{2,i}(t_0, t_0)) \right] \dots \left[\prod_{i=1}^{5n} (1 - Q_{5,i}(t_0, t_0)) \right] \quad (17)$$

여기서, $Q_{1,i}$ = 제어장비 누적 고장확률함수
 $Q_{2,i}$ = 발전기 계전기 누적 고장확률함수
 $Q_{3,i}$ = 가스터빈 압축기 누적 고장확률함수
 $Q_{4,i}$ = 배기가스 덕트 누적 고장확률함수
 $Q_{5,i}$ = 냉각수 펌프 누적 고장확률함수

3. 사례연구

사례연구에서는 전력계통 설비 중 복합화력 발전설비의 고장실적을 바탕으로 제안하는 방법을 적용하였다. 고장실적은 1977년부터 2003년까지의 데이터이며, 앞서 언급하였듯이 5가지 구성요소로 데이터를 분리하여 정리하였다. 26년 동안 각 구성요소의 고장실적은 다음 표 1과 같다.

표 1. 각 구성요소별 고장실적(1977년-2003년)

Component	제어장비	발전기 계전기	가스터빈 압축기	배기가스 덕트	냉각수 펌프
고장실적	26	14	10	9	7

표 1의 고장실적을 바탕으로 Type II Censoring를 적용하기 위해서, 2003년을 기준으로 1977년 까지 고장년도 마다 오름차순으로 데이터를 정리하면 다음 표 2와 같다. 제 1열은 각 요소별 고장 시 발전기 년 수를 의미하며, 제2열부터 5열은 각 요소별 발전기 년 수에서의 고장횟수를 의미한다. 즉, 제 1열의 Year 26은 2003년에 고장횟수를 의미한다. 표 2를 바탕으로 Type II Censoring를 적용하여 식(9)에 의해 추정된 기울기와 편차 및 형태모수와 척도 모수는 표3과 같다.

표 3에서 추정된 모수를 이용하여, 각 구성요소별 누적고장확률 함수를 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 식 (16)와 (17)를 이용하여, 앞에서 언급한 직렬(Series) 신뢰도 모델에 의한 복합화력 발전기의 고장확률 함수 $Q_S(t_0)$ 를 그림 3과 같이 구할 수 있다. 또한, 표 4는 시간 t_0 에 따른 $Q_S(t_0)$ 값을 나타내었다.

표 2. 통계적 분석법에 대한 고장실적 분석(2003년 기준)

Year	요소	제어장비	발전기 계전기	가스터빈 압축기	배기가스 덕트	냉각수 펌프
1	1	1	1	-	-	2
2	2	2	-	-	2	-
3	-	-	2	1	1	1
4	1	3	1	1	1	2
5	2	2	2	1	1	1
6	7	3	2	1	1	1
7	3	3	-	1	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	2	-	-	-	-	-
10	1	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-
18	1	-	-	2	-	-
19	2	1	-	-	-	-
20	2	-	-	-	-	-
21	2	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-
24	-	-	1	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-

표 3. 각 요소별 형태 및 척도모수

Para.	요소	제어장비	발전기 계전기	가스터빈 압축기	배기가스 덕트	냉각수 펌프
a	1.5252	1.7508	1.4244	1.3685	1.5147	
b	-3.6236	-3.3373	-2.7595	-2.8281	-2.1131	
α (척도)	10.7598	6.7272	6.9400	7.8977	4.0352	
β (형태)	1.5252	1.7508	1.4244	1.3685	1.5147	

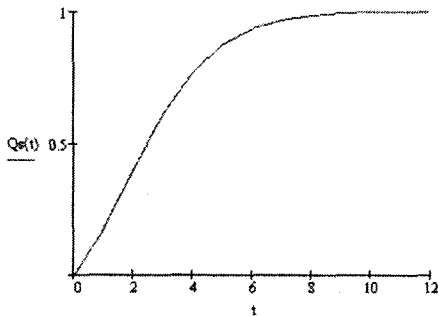


그림 3. 복합화력 발전기의 고장확률 함수 $Q_S(t_0)$

표 4. 고장확률 함수 $Q_S(t_0)$ 의 값

년도	고장확률 $Q_S(t_0)$	년도	고장확률 $Q_S(t_0)$
1	0.169	7	0.968
2	0.405	8	0.985
3	0.615	9	0.994
4	0.771	10	0.997
5	0.873	11	0.999
6	0.935	12	1

4. 결 론

본 논문에서는 전력계통 신뢰도 평가에 있어, 전력계통설비중 복합화력 발전기의 고장실적을 이용하여, 각 구성요소를 연속적으로 연결된 하나의 시스템으로 보고 직렬(Series) 신뢰도 모델을 구현하여 복합화력 발전기의 고장확률을 예측하였다. 사례연구에서 알 수 있듯이 각 구성요소별 고장확률 보다, 하나의 시스템으로 보는 직렬(Series) 신뢰도 모델에서의 고장확률이 높음을 알 수 있다. 이는 직렬(Series) 연결된 구성요소가 많아질수록 신뢰도(Reliability)는 낮아지고, 이와 상보적인 관계에 있는 고장확률이 높아지기 때문이다.

전력시장이 개방되고 경쟁적 환경이 조성됨에 따라 경제적인 계통운영을 위해 전력계통 신뢰도 평가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신뢰도 평가는 과거 고장실적이 얼마나 정확하고 충실하게 기록되어져 있느냐에 따라 그 정확성을 논할 수 있을 것이다. 따라서 전력계통 설비에 대한 정확한 D/B구축은 반드시 이루어져야 하는 과제임에는 틀림이 없다. 앞으로 축적되는 정확한 고장실적을 바탕으로 본 논문에서 제안하는 방법을 이용한다면 전력계통 설비(발전기, 변압기, 선로 등)의 고장확률 예측을 이용한 신뢰도 평가를 비교적 간단히 수행할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. M. Bucci, R. V. Rebbapragada, A. J. McElroy, E. A. Chebli and S. Driller, "Failure prediction of underground distribution feeder cables", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, No.4, October 1994.
- [2] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability evaluating of Engineering system", Plenum Press, 1992.
- [3] 이성훈, 이승혁, 김진오, "통계적 분석방법을 이용한 복합화력 발전설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측", 전기학회논문지, 제 54A권, 제 10호, pp. 480-486, 2005, 10.
- [4] M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, "Statistical analysis of reliability data", Chapman and Hall, 1991.