2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

통계적 분석 방법을 이용한 발전설비의 평균수명 계산

이성훈* · 이승혁* · 김진오* · 전동훈** · 김태균**
* 한양대학교 · ** 전력연구원

Calculating Mean Life of Generators with Aging failures Data Using Data Analytic Method

Sung-Hoon Lee* · Seung-Hyuk Lee* · Jin-O Kim* · Dong-Hoon Jeon** · Tae-Kyun Kim**
* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University · ** KEPRI

Abstract - This paper proposes a method to consider an aging failure probability and survival probability of power system components unlike uses only aging failure probability in existing mean life calculation. The estimates of the mean and its standard deviation is calculated by using Weibull distribution and each estimated parameters is obtained from Data Analytic Method (TypeⅡ Censoring). The parameter estimation using Data Analytic Method is simpler and faster than a traditional calculation method. This paper shows how to calculate the mean life and its standard deviation by the proposed method and illustrates a exactness using real historical records of generator utilities in korea.

1. 서 론

전력계통의 신뢰도 평가는 그 중요성이 증대되고 사용범위 또한 넓어짐에 따라 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 신뢰도 평가에서는 설비의 수명과 관련하여 수리할 수 있는 고장(repairable failures)에 대해서만 고려되었지만, 수리할 수 없는 고장(nonrepairable failures) 즉, 노화고장(aging failures)을 고려해야만 좀 더 정확한 신뢰도 평가를 할 수 있다 [1].

노화고장을 고려한 신뢰도 평가에 있어 평균과 표준편차는 중요한 변수이다. 이러한 설비의 평균수명과 표준편차를 계산 하는 방법은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 표본 평균수명 계산방법
- Normal 분포를 이용한 계산 방법
- Weibull 분포를 이용한 계산 방법

기존의 표본 평균수명 계산방법은 전체 설비 중 고장설비의 생존년수를 더한 합을 고장 난 설비의 개수로 나누는 방법으로 고장이 발생하지 않은 설비에 대한 생존확률이 고려되지 않았기 때문에 정확한 수명을 예측했다고 할 수 없다 [2]. 본 논문에서는 수명관리에 대한 신뢰도 평가로써 평균수명 예측을 Weibull 분포와 생존확률을 고려하여 예측하였다. Weibull 분포는 형태모수(shape parameter)와 척도 모수(scale parameter)로써 함수를 정의하며, 추정된 각 모수를 통하여 평균과 표준편차를 계산한다.

본 논문에서는 실제한전계통의 과거 발전설비의 데이터를 이용하여 평균수명을 계산하였다. 발전기는 특성상 수명이 길기 때문에 노화에 대한 데이터 취득에 어려움이 있다. 따라서 그 중 비교적 수명이 짧은 복합화력 발전기에 대한 수명 고장실적을 바탕으로 생존확률을 고려한 평균수명계산을 하였다.

기존의 연구[2]에서는 평균수명계산 방법의 일환인 Weibull 분포의 모수추정에 대해 Gradient Descent Method 알고리즘을 이용하였다. 하지만, Gradient Descent Method 알고리즘은 수렴속도나 계산방법 상에 복잡성을 상당부분 지니고 있다. 따라서 본 논문에서 Weibull 분포 모수추정에 처리속도가 기존의 알고리즘보다 빠르고 비교적 정확한 통계적 분석방법(TypeⅡ Censoring)을 이용한 알고리즘을 제안하는 바이다. 또한, 사례연구에서 기존 알고리즘을 이용하여 추정한 값과 제안한 알고리즘의 추정결과를 비교하였다.

2. 설비의 평균수명 계산

2.1 고장확률과 생존확률

그림 1은 시간 t 에 대한 확률밀도함수 $f(t)$에서 고장확률함수 $Q(t)$와 생존확률함수 $R(t)$의 관계를 보여준다. 고장확률함수 $Q(t)$는 $f(t)$의 누적 확률밀도함수로서 정의될 수 있으며, 미분한 값은 식 (2)와 같이 확률밀도함수 $f(t)$가 된다. 생존확률함수 $R(t)$는 $Q(t)$와 식 (1)과 같은 관계가 있다 [3].

$$R(t) = 1 - Q(t) \tag{1}$$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{d(t)} \tag{2}$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t)\,dt \tag{3}$$

식 (1)~(3)에 의해 $R(t)$는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)\,dt = \int_t^\infty f(t)\,dt \tag{4}$$

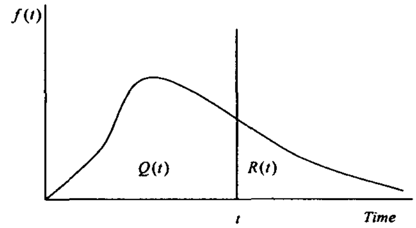

그림 1. 고장확률과 생존확률 밀도함수

그림 1처럼 실제 많은 경우에 확률밀도함수는 시간 t 동안 고장확률함수 $Q(t)$뿐만 아니라 t 이후의 생존확률함수 $R(t)$에 의해 표현될 수 있으며, 평균수명에 관한 신뢰도 평가에 있어서도 $Q(t)$, $R(t)$ 함수 모두 고려해야만 한다. 전력계통 설비는 비교적 긴 수명을 갖기 때문에 많은 노화고장실적(aging failure)을 갖지 못하는 물리적 특성을 지닌다. 따라서 평균수명을 정확히 예측하는 일은 상당히 어렵다. 더구나, 생존확률(survival probability)을 고려하지 않은 기존의 평균수명 계산방법에는 많은 오차를 포함하고 있다.

2.1.1 Normal 분포

평균수명계산에 주로 사용되는 확률분포함수로는 Normal 분포와 Weibull 분포함수가 있다. 표준 Normal 분포의 확률밀도함수 식 (5)와 같이 정의된다.

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} exp[-\frac{z^2}{2}] \quad (5)$$

확률변수 z는 다음과 같은 다항식 근사법(Polynomial approximation)으로 식 (6)에 의해 계산된다.

$$z = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} + e(Q) \quad (6)$$

여기서, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{Q^2}}$ 이고,

$c_0 = 2.515517 \quad c_1 = 0.802853 \quad c_2 = 0.010328$

$d_1 = 1.432788 \quad d_2 = 0.189269 \quad d_3 = 0.001308$ 이다.

여기서, $|e(Q)| < 0.45 \times 10^{-4}$는 무시할 수 있을 정도로 작은 값이다. Normal 분포를 이용한 평균수명계산은 지면관계상 참고문헌 [2]를 참고하기 바란다.

2.1.2 Weibull 분포

Weibull 분포의 확률밀도함수는 식 (7)과 같고, 식(8)은 Weibull 분포의 생존확률함수이다 [3].

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (7)$$

$$R(t) = exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (8)$$

고장은 신뢰도 욕조곡선(Bathtub Curve)을 따라 초기고장기, 우발고장기, 노화고장기(경년기)의 형태로 나눌 수 있다. 노화고장의 대부분은 설비수명의 후반기에서 발생 된다 [3]. 그러므로 Weibull 분포는 노화고장의 특성을 가장 잘 나타내는 분포함수이다. 식 (7)에서 α, β 는 각각 척도모수와 형태모수로써 β의 값에 따라 다양한 고장형태를 나타내는데, $\beta > 1$는 노화고장을 나타낸다. 척도모수와 형태모수를 추정하는 방법으로 본 논문에서는 Weibull 분포를 이용한 기존의 Gradient Descent Method와 제안한 통계적 분석방법을 실제 한전계통 고장실적데이터에 적용하여 계산하고, 두 기법을 비교 분석하였다 [2].

2.2. Weibull 분포를 이용한 평균수명 계산

2.2.1 Gradient Descent Method

Gradient Descent Method는 다음 식 (9)를 이용하여 각 모수들을 추정할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \lambda_k G_k \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{x}$: α, β 을 나타내는 벡터
G : gradient 벡터
λ : step length
k : 반복횟수

Gradient Descent Method에 대한 자세한 사항은 지면관계상 참고문헌 [2], [4]를 참고하기 바란다. Gradient Descent Method를 이용하여 추정된 모수는 식 (10)과 식 (11)를 이용함으로써 평균수명과 표준편차를 구할 수 있다.

$$\mu = \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \alpha^2[\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\beta})] \quad (11)$$

여기서 $\Gamma(y) = \sqrt{2\pi} y^{(y-0.5)} e^{-y}(1 + \frac{1}{12y})$ 이다.

2.2.2 통계적 분석 방법 : Type II Censoring

수명과 관련된 데이터 분석에는 두 가지 경우가 있다.

1) 분석하려는 시점 c 에 관측된 n개의 설비 모두 수명 $T_i (i = 1, 2, ..., n)$을 다 한 경우 $(T_i < c)$
2) 수명을 다하거나 다하지 않은 설비가 존재하는 경우 $(T_i > c)$

데이터를 분석하는 방법에 있어 전자를 Type I Censoring이라고 하고 후자를 Type II Censoring이라고 한다. Type I Censoring으로 분석되는 데이터는 표본평균계산방법을 사용하여 평균수명을 쉽게 구할 수 있다. 그러나 Type II Censoring으로 분석되는 데이터는 수명을 다하지 않은 설비에 대한 확률적 변수를 고려해야만 한다. 따라서 $T_i > c$ 이므로 ϵ_i 라는 오차 확률변수를 고려하면 $T_i = c + \epsilon_i$ 관계식이 유도된다. 이러한 관계를 이용한 경험적 생존함수 (empirical survivor function : $\hat{S}(t)$)를 확률공간에 이동시켜 각 모수를 추정할 수 있다. $\hat{S}(t)$를 시간 t에 대하여 다음과 같은 $t_{(1)} < t_{(2)} < \cdots < t_n$ 순서로 확률공간에 점을 찍 을 수 있으며 확률공간상에 $\hat{S}(t_{(i)})$의 궤적을 살펴보면 다음 식 (12)와 같다.

$$\hat{S}(t_{(i)}) = 1 - \frac{(i-1)}{n}$$
$$\hat{S}(t_{(i)} + 0) = 1 - \frac{(i-1)}{n} - \frac{1}{n} \quad (12)$$

여기서, $\hat{S}(t_{(i)} + 0)$는 $\hat{S}(t_{(i)})$의 다음 이동위치를 의미한다. 따라서 $t_{(i)}$에서 $\hat{S}$의 평균값은 식 (13)과 같다.

$$\frac{1}{2}\{\hat{S}(t_{(i)}) + \hat{S}(t_i + 0)\} = 1 - \frac{(i-1)}{n} - \frac{1}{2n} = 1 - \frac{(i - \frac{1}{2})}{n} \quad (13)$$

$\hat{S}$는 $(t_{(i)}, 1 - p_i)$의 위치로 나타낼 수 있으며 p_i를 타점위치(plotting positions)라고 한다. 식 (13)에 의해서 p_i는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i = \frac{i - \frac{1}{2}}{n} \quad (14)$$

그러므로, 경험적 생존함수의 확률공간상의 위치는 식 (15)와 같다.

$$(x, y) = (t_{(i)}, 1 - \frac{(i - \frac{1}{2})}{n}) \quad (15)$$

Weibull 분포의 생존함수 식 (8)의 양변에 log를 취하면 식 (16)과 같이 표현된다.

$$log\{-logS(t)\} = \beta logt - \beta log\alpha \quad (16)$$

따라서 식 (15)와 식 (16)에 의해서 Weibull 분포 생존함수는 $logt_{(i)}$와 $log\{-log[1-(i-1/2)/n]\}$으로 나타나는 직선의 선형 함수가 된다. 또 직선 함수의 기울기와 절편을 각 각 a, b 라고 하면 척도모수 $\alpha = exp(-b/a)$이고, 형태모수 $\beta = a$ 가 된다 [5,6].

3. 사례 연구

본 논문 서론에서 언급한 두 가지 모수추정 방법을 우리나라 전력계통내의 발전설비 중 복합화력 발전기에 대하여 각각 적용하여 두 결과를 비교해 보았다.

조사집단의 전체 발전기수는 36대이고 2003년을 기준으로 지난 41년간 36대 중 16대만이 노화고장(aging failures)에 의해서 교체되거나 제거된 발전기들이다. 노화고장은 불이나 폭발에 의한 사고가 아닌 생산단계에 있어서부터 결점을 가진 발전기, 발전기 부품불량, 작업자의 부적당한 운영 등 설비수명을 줄이는 원인과 관련된 고장이다. 조사집단 내 발전기의 주위환경, 설비유지,

운영방식, 설비위치 등은 동일하다고 가정을 하였다. 표 1은 조사된 발전기의 수명을 보여준다. 표 1에서 고장년도는 설비가 수명을 다해 교체되거나 설비에서 제거된 년도를 의미한다. 표 1에서 얻은 데이터를 바탕으로 다시 정리하면 표 2와 같이 나타 낼 수 있다. 표 2의 제 1 열은 년 수를 나타내며, 제 2 열은 표의 밑에서부터 가동되었던 발전기들을 누적한 수이며, 제 3 열은 고장난 발전기의 수이다.

I. Gradient Descent Method

표 2로부터 Gradient Descent Method를 적용하면 각각 척도와 형태 모수는 19.541과 2.593으로 추정 되었다. 추정된 모수를 식 (10)과 (11)로부터 평균수명과 표준편차를 구해보면 각각 17.341과 7.206이다.

표 1. 각 발전기 수명

NO	설치 년도	고장 년도	NO	설치 년도	고장 년도
1	1962	1974	19	1996	
2	1962	1975	20	1997	
3	1967	1974	21	1992	
4	1962	1989	22	1993	
5	1962	1993	23	1992	
6	1962	1968	24	1993	
7	1968	1993	25	1994	
8	1977	1989	26	1997	
9	1968	1993	27	1992	
10	1975	1993	28	1994	
11	1977	1993	29	1993	
12	1977	1993	30	1993	
13	1977	1997	31	1993	
14	1979	1997	32	1993	
15	1977	1997	33	1995	
16	1979	1997	34	1996	
17	1992		35	2000	
18	1992		36	2001	

표 2. 가동 발전기 및 고장 발전기수

NO	가동 발전기	고장발전기	NO	가동 발전기	고장발전기
0	36		22	16	
1	36		23	16	
2	36		24	16	
3	35		25	14	2
4	34		26	14	
5	34		27	9	1
6	34	1	28	9	
7	32	1	29	8	
8	30		30	8	
9	29		31	8	1
10	27		32	8	
11	21		33	8	
12	16	2	34	8	
13	16	1	35	8	
14	16		36	6	
15	16		37	5	
16	16	2	38	5	
17	16		39	5	
18	16	3	40	5	
19	16		41	5	
20	16	2			

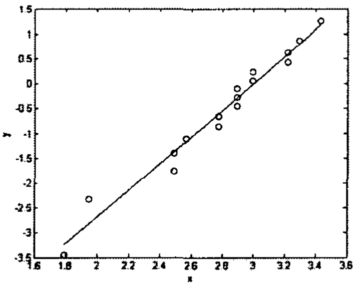

그림 2. 복합화력 발전기에 대한 Weibull 분포 모수추정 곡선

II. 통계적 분석방법(Type II Censoring)

다음은 통계적 분석방법을 같은 데이터에 적용해 보도록 하겠다. 그림 2는 앞에서 설명한 경험적 생존 $\hat{S}(t)$을 log 변환해서 확률공간상에 점을 찍었다. x축과 y축은 각각 $logt_{(i)}$와 $log\{-log[1-(i-1/2)/n]\}$ 이다. 그림 2의 각점들은 선형적 직선의 형태로 근사화 된다. 기울기와 절편을 추정한 결과값은 각각 2.680과 -8.038이다. $\alpha = exp(-b/a)$이고 $\beta = a$ 이므로 척도 모수와 형태 모수는 각 각 20.070과 2.680됨을 알 수 있다. 추정된 모수를 식 (10)과 (11)에 대입하여 계산된 평균수명과 표준편차는 17.875와 7.193이다. 표 3은 제시된 두 추정방법으로 추정한 각 모수, 평균수명 및 표준편차를 표로 나타내었다.

표 3. 발전기의 평균수명과 표준편차

	Gradient descent방법	통계적 분석방법
형태 모수	2.593	2.680
척도 모수	19.541	20.070
평 균	17.341	17.875
표준 편차	7.206	7.193

표 3에서 알 수 있듯이 Gradient Descent Method에 의해 추정된 모수값과 통계적 분석방법에 의해 추정된 모수값이 거의 동일함을 알 수 있다. 두 방법에 의한 평균수명과 표준편차 또한 거의 일치하였다. 따라서 통계적 분석방법에 의한 계산법은 기존의 Gradient Descent Method와 비교해 볼 때 동일한 결과를 가짐을 알 수가 있다. Gradient Descent Method는 프로그램 구현 및 계산에 많은 시간이 소요되고 통계적 분석법(Type II Censoring)은 보다 간단한 장점에 의해 짧은 시간이 소요됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전력계통 신뢰도 평가에 있어 생존확률을 고려한 평균수명과 표준편차 계산을 하였다. 표본 평균계산방법은 설비의 고장확률만을 고려하기 때문에 적당한 추정법이 될 수 없다. 기존의 Gradient Descent Method는 설비의 평균수명에 대한 정확한 추정방법인 반면에 계산시간이 많이 소요된다. 따라서 본 논문에서 제안한 통계적 분석방법(Type II Censoring)을 이용하면 비교적 간단히 평균수명을 계산할 수 있을 뿐 아니라 정확성면에서 Gradient Descent Method와 비교해 볼 때 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 실제 복합화력 발전기의 경제수명과 교체시기가 20년 이내인 것을 감안 해보면 본 연구의 결과가 정확함을 알 수 있다. 앞으로 본 연구를 통해 제시된 방법을 이용하여 발전기, 변압기, 선로, 계전기 등 계통설비의 수명과 관련된 신뢰도 평가를 간단히 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력연구원의 연구지원(기금-119J03PJ03)에 의해 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[1] Wenyuan Li, "Incorporating aging failures in power system reliability evaluation", *IEEE Transaction on Power System*, vol.17, pp.918-923, August. 2002

[2] Wenyuan Li, "Evaluating mean life of power system equipment with limited end-of-life failure data", *IEEE Transaction on Power System*, vol.19, NO.1, February 2004

[3] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability evaluating of engineering system", *Plenum Press*, 1992

[4] S. S. Rao, "Engineering optimization", *A Wiley-Intersection Publication*, 1995

[5] M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, "Statistical analysis of reliability data", *Chapman and Hall*, 1991

[6] 배도선, 전영록, "신뢰성 분석", 마르케, 1999