

와이블분포를 이용한 변전소 신뢰도 평가에 관한 연구

A Study on the Substation Reliability Assessment Using Weibull Distribution

金 光 源*
(Gwang-Won Kim)

Abstract - In power system study, reliability assessment has been an important topic during past several decades because sudden power interruption can bring about enormous economic loss. Although the size of a substation is smaller than that of generation system or transmission system, switching actions after fault(s) make reliability assessment of substation rather complex. Therefore Monte Carlo simulation has been applied to this problem since 1990s. The Monte Carlo simulation can consider complex situations such as switching actions easily and permit various probability distributions in describing substation elements. Despite this ability of Monte Carlo simulation, one-parameter exponential distribution is still popular in this reliability assessment. This paper examines the characteristics of several two-parameter probability distributions, and offers new parameter decision rule based on average and variance of the target to be modelled. In case study, this paper shows the profits by using Weibull distribution which is one of two-parameter probabilistic distributions instead of exponential one.

Key Words : Reliability Assessment, Substation, Monte Carlo Simulation, Weibull Distribution

1. 서 론

전력시스템의 가장 기본적인 요건은 양질의 전기를 수요자에게 중단없이, 경제적으로 공급하는 것이지만, 모든 설비는 언제나 고장 가능성을 내포하고 있으며 전력시스템은 많은 설비들의 조합체이므로 전력을 중단없이 항시 공급할 수는 없다. 지난 1977년에 있었던 뉴욕의 대정전은 직·간접적으로 약 3억 5천만불의 경제적 손실을 초래했다고 추정되는 등[1] 정전으로 인한 전기에너지 공급의 중단은 사회적으로 큰 경제적 손실을 가져올 수 있으므로 전력 공급의 신뢰도를 향상시키기 위한 투자가 뒷받침되어야 한다. 그러나, 신뢰도를 향상시키므로써 기대되는 경제적 이득과 신뢰도를 향상시키는데 필요한 경제적 부담은 서로 상충 관계에 있으므로, 투자 효과를 극대화하기 위한 투자의 대상과 범위의 결정이 매우 중요하며, 이를 위하여 전력시스템의 신뢰도 평가(reliability evaluation)에 대한 연구가 선행되어야 한다.

변전소의 신뢰도 평가에서는 부하점(load point)과 전원점(source point)의 연결여부가 신뢰도 지수와 직접적으로 관련되므로 발전계통을 제외한 송전 또는 배전계통의 신뢰도 평가와 개념적으로 유사하다. 송·배전계통의 신뢰도 평가는 1960년대 중반부터 시작되었고[2, 3], 초기의 연구는 주로 전력시스템을 보다 정확하게 모델링하는 신뢰도 모델의 정

립을 그 목표로 하고 있다. 송·배전 계통의 신뢰도 해석에 있어서 초기에는 고장상태와 정상상태로 구성되는 2개상태(two state) 모델을 사용하였으나 1970년대에 접어들면서 스위칭 조작을 고려한 3개상태(three state) 모델을 이용한 신뢰도 해석이 이루어졌다[4]. 이러한 연구는 변전소 또는 개폐소의 신뢰도 평가 연구의 기초가 되었으며, Billinton은 3개상태 모델을 기반으로 고장과 관계없는 건전구간의 정전여부에 따라서 구성요소의 고장을 능동고장(active failure)과 수동고장(passive failure)으로 구분함으로써[5] 이 후의 연구에 큰 영향을 미쳤다.

전력시스템의 신뢰도 평가방법은 그 신뢰도 지수의 평가 방법에 따라서 크게 해석적(analytical) 방법과 모의(simulation)에 의한 방법으로 구분할 수 있으며, 모의에 의한 방법은 몬테카를로(Monte Carlo) 방법으로 대표되므로 이 후 모의에 의한 방법을 단순히 몬테카를로법이라고 표기하기로 한다. 두 방법은 모두 확률론에 그 이론적 기반을 두고 있으나, 해석적 방법은 평가 대상 시스템에 대한 해석 모델을 만들고 계산을 통하여 신뢰도 지수를 산출하는 반면, 몬테카를로법은 평가 대상 시스템의 확률 과정을 실제로 반복 모의하면서 관측에 의하여 신뢰도 지수를 산출한다. 신뢰도 해석의 초기 이론은 모두 해석적인 방법에 기초하고 있으나 1970년대 중반부터는 발전-송전계통의 신뢰도 해석에 몬테카를로법이 도입되기 시작하였고[5], 그 후 몬테카를로법은 다양한 분야에 다양한 기법으로 적용되어 왔다. 한편, 변전소 또는 개폐소의 신뢰도 평가에는 몬테카를로법의 적용이 다소 늦어서 1990년대 초반에야 처음으로 이에 관한 논문이 발표되었다[6].

본 논문에서는 몬테카를로법을 이용하여 변전소의 신뢰도

* 正 會 員 : 蔚山大 工大 電氣電子情報시스템工學部
助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 2月 20日

最終完了 : 2001年 11月 29日

를 평가하였다. 변전소의 경우에는 일반적으로 신뢰도 평가 대상의 규모가 크지 않으나 사고가 발생한 후의 스위칭 조작이 단순하지 않으므로 해석적인 방법보다는 몬테카를로법을 사용하는 것이 정확한 신뢰도 지수 산출에 적합하다. 몬테카를로법을 이용한 변전소의 신뢰도 평가에 대한 기존 연구결과는 대체적으로 만족스러우나 몬테카를로법의 장점인 다양한 확률변수의 이용에 대한 연구 결과가 구체적으로 제시되고 있지는 않다. 특히, 변전소를 이루는 구성요소의 고장과 수리, 보수와 관계된 확률변수의 생성절차에 대해 제시된 결과가 부족한 형편이므로 본 논문에서는 신뢰도 평가에서 지수분포를 대신하여 이용 가능한 확률변수를 정리, 비교하고, 각 확률변수 파라메타의 간편한 결정 방법을 제안하였으며, 적절한 비지수분포를 사용함으로써 신뢰도 해석에서 얻게 되는 이득을 사례연구에서 보였다.

2. 확률변수의 고찰

신뢰도 해석과 관련된 확률변수의 모델링에는 지수분포를 사용하는 것이 가장 일반적이다. 구성 요소가 투입되어 고장이 발생하기까지의 시간, 고장수리기간, 보수기간 등은 매 경우마다 다르므로 이들 물리량은 시간에 대한 확률변수이다. 이 중에서 우선 구성 요소가 투입되어 고장 발생까지 소요되는 시간을 (1)의 지수분포로 모델링하면, 해당 요소의 신뢰도 함수(reliability function)는 (2)와 같다.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{1}$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = e^{-\lambda t} \tag{2}$$

이 때, 해당 요소의 고장율(failure rate)은 (3)과 같이 정의되며, 지수분포에서 상수이다.

$$fr(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(K < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda \tag{3}$$

고장율이 상수라는 의미는 시각 t까지 고장이 발생하지 않은 경우에 앞으로의 미소시간 내에 고장이 발생할 확률이 t와 무관하다는 것으로, 이전의 운전시간은 현재의 고장율에 영향이 없다는 것을 의미한다. 또한, 고장발생까지의 평균시간(Mean Time Between Failure: MTBF)은 (4)와 같이 정의되며, 지수분포에서는 고장율의 역수로 주어진다.

$$MTBF = E[A(t)] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

이상과 같이 지수분포의 확률변수는 고장율이 상수이고, MTBF가 고장율의 역수이므로 확률과 통계이론을 이용하여 해석적으로 신뢰도를 평가하는데 매우 간편하다. 또한 고장 수리기간과 보수기간의 모델링에서도 같은 결과를 기대할 수 있다. 일반적으로 시간에 대한 요소의 고장율 특성은 욕조(bath-tube)의 바닥 형태로 나타나며, 신뢰도 평가에 있어서는 각 요소의 초기 세팅단계와 후기 노후상태를 제외하여 고장율이 상수의 특징을 갖는 경우를 가정하므로 고장 발생

까지의 기간을 지수분포로 모델링하는 것이 타당하다.

반면, 고장요소 수리기간의 모델링에서는 그 특성이 고장 발생의 경우와는 차이가 있으므로 고장율에 해당하는 수리율(repair rate)을 상수로 보기에 무리가 따른다. 이에, 수리기간의 확률변수로서 지수분포 대신 와이불분포, 로그정규분포, 감마분포 등을 사용한 연구가 진행되어 왔으나 각각의 장·단점에 대한 비교와 구체적인 구현절차에 대한 연구결과는 찾아보기 힘들다.

감마분포, 와이불분포, 로그정규분포는 각각 (5), (6), (7)과 같이 독립변수 t와 두 개의 파라메타로써 표현된다.

$$f(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \exp(-\lambda t) \tag{5}$$

$$f(t) = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} \exp(-\lambda^\alpha t^\alpha) \tag{6}$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{7}$$

위의 세 가지 분포는 특수한 경우를 제외하면 t=0 에서 확률밀도가 '0'이며, 확률밀도가 최대인 정점을 가진다. 특히, 와이불분포와 감마분포는 $\alpha=1$ 인 경우에 파라메타 λ 인 지수분포와 동일하며 α 를 변경함으로써 다양한 형태의 확률분포를 표현할 수 있다. 다음에 각 분포의 특징을 수록하였다.

2.1 감마분포

고장수리기간을 감마분포의 확률변수로 취급하였을 때, 평균(M)과 분산(V)으로부터 감마분포의 파라메타 α 와 λ 는 (8), (9)를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{M}{V} \tag{8}$$

$$\alpha = M \lambda \tag{9}$$

확률변수를 생성하는 가장 간단하면서도 정확한 방법은 역변환법이다. 역변환법은 확률분포함수의 역함수를 해석적으로 구할 수 있는 경우에 유용한데, 감마분포의 경우에는 확률밀도함수 (5)의 정적분을 해석적으로 구하기 어려운 관계로 감마분포의 확률변수를 생성하려면 수치해석적인 방법을 이용하여야만 한다.

2.2 와이불분포

와이불분포의 경우에 파라메타 α 와 λ 를 평균(M)과 분산(V)의 식으로 표현하면 (10), (11)과 같다.

$$\frac{V}{M^2} = \frac{\Gamma(2/\alpha+1)}{\Gamma(1/\alpha+1)^2} - 1 \tag{10}$$

$$\lambda = \frac{1}{M} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) \tag{11}$$

와이불분포에서는 주어진 평균과 분산에 대해 (10)으로부터

터 α 를 구하고, 구하여진 α 와 평균으로써 (11)을 이용하여 λ 를 구할 수 있다. 한편, (10)은 α 에 대하여 내재적 (implicit)인 표현이므로 α 의 계산에는 뉴턴-랩슨법과 같은 수치해석적 방법을 이용하여야 한다. 한편, 와이불분포의 확률분포함수는 (12)와 같고, 이에 역변환법을 적용하면 (13)으로써 와이불분포의 확률변수를 생성할 수 있다.

$$F(t) = [1 - \exp(-\lambda t^\alpha)] \quad (12)$$

$$X = \frac{1}{\lambda} [-\ln(1-U)]^{1/\alpha} \quad (13)$$

위에서, U는 [0,1] 사이의 균일분포 확률변수이다.

2.3 로그정규분포

로그정규분포의 파라메타 μ 와 σ^2 는 분포의 평균(M)과 분산(V)을 이용하여 각각 (14), (15)로써 표현된다[1].

$$\sigma^2 = \ln\left(\frac{V}{MTTR^2} + 1\right) \quad (14)$$

$$\mu = \ln MTTR - \frac{\sigma^2}{2} \quad (15)$$

로그정규분포의 확률변수를 생성하려면 표준정규분포의 확률변수의 생성이 선행되어야 하며, 다음의 절차를 따른다.

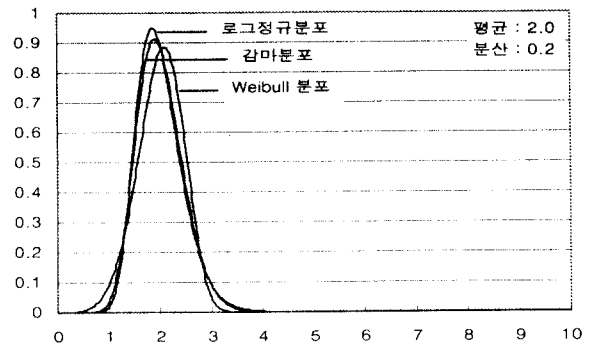
- 절차 1. 표준정규분포의 확률변수 Z의 생성.
- 절차 2. $X = \mu + \sigma Z$ 로써 평균과 표준편차가 각각 μ , σ 인 정규분포의 확률변수 생성.
- 절차 3. $Y = e^X$ 로써 파라메타가 μ , σ 인 로그정규분포의 확률변수 생성.

한편, 표준정규분포는 [0,1] 사이의 균일분포 확률변수 U1, U2를 사용하여 (16)으로 표현되는 Box-Muller법에 의해 구할 수 있다.

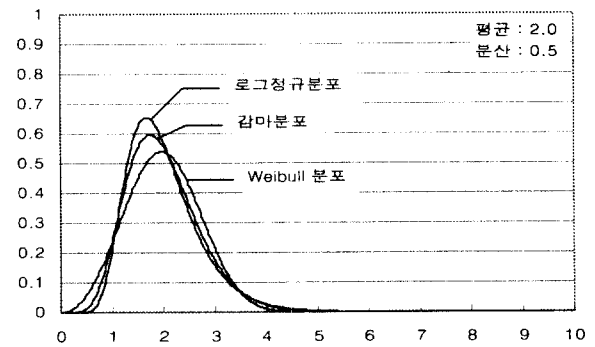
$$Z = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2) \quad (16)$$

식 (5), (9), (10), (11)을 보면, 확률밀도함수에 있어서 지수분포는 하나의 파라메타로 구성되는 반면, 감마분포, 와이불분포, 로그정규분포는 두 개의 파라메타로써 구성된다. 따라서, 지수분포는 확률분포의 평균값만으로 유일하게 결정되는 반면, 나머지 확률분포는 평균값 외에 또 다른 통계자료가 있어야 유일하게 결정되며 본 논문에서는 평균값과 함께 확률분포의 분산을 이용하여 각 확률분포를 유일하게 결정할 수 있음을 보였다.

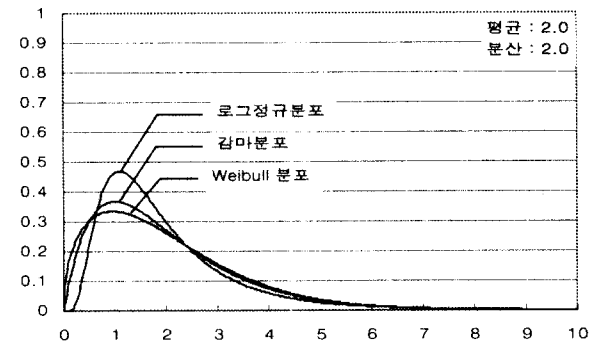
본 논문에서는 감마분포, 와이불분포, 로그정규분포의 확률밀도 함수의 모양을 살펴보고자 확률분포의 평균과 분산이 주어진 경우에 각 분포의 확률밀도함수를 비교하였다. 확률분포의 평균을 2로 고정하고 분산을 각각 0.2, 0.5, 2.0, 4.0으로 변화시킨 경우에 대한 확률밀도 함수가 그림 1에 나타나 있다.



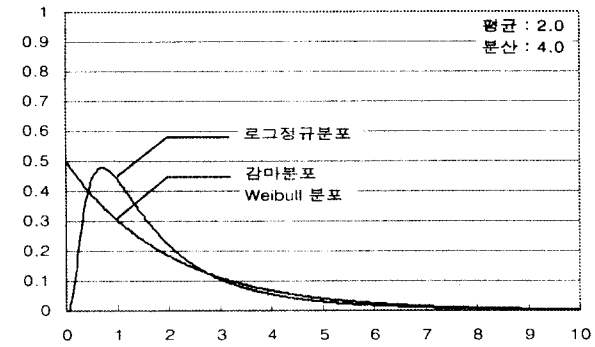
(a) 분산이 0.2인 경우
(a) Variance is 0.2



(b) 분산이 0.5인 경우
(b) Variance is 0.5



(c) 분산이 2.0인 경우
(c) Variance is 2.0



(d) 분산이 4.0인 경우
(d) Variance is 4.0

그림 1 평균이 2.0인 경우의 확률밀도함수
Fig. 1 Probability density function when average is 2.0

그림 1부터, 분산이 작은 경우에는 각 분포의 확률밀도함수가 거의 동일하지만, 분산이 커짐에 따라서 로그정규분포는 나머지 분포와는 형태가 다소 다름을 알 수 있다. 또한 감마분포와 와이블분포는 분산이 커짐에 따라서 지수분포에 가까워짐을 알 수 있다. 수식을 살펴보면 감마분포나 와이블분포는 파라메타 α 가 1인 경우에 지수분포와 같아지며 (12), (13)으로부터 확률분포의 분산이 평균의 제곱과 같은 경우에 지수분포가 됨을 알 수 있다.

이상 살펴본 감마분포, 와이블분포, 로그정규분포의 특징을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 확률분포의 평균과 분산이 같은 경우에 감마분포와 와이블분포는 유사하다.
2. 로그정규분포는 정규분포로부터 파생하였기에 그 형태가 감마분포나 와이블분포와는 다르게 정규분포의 잔재가 남아있다.
3. 와이블분포나 로그정규분포는 역변환법에 의하여 구현하기에 용이하지만 감마분포의 구현에는 수치적분이 필요하므로 많은 시간이 소요된다.

한편, 지수분포는 확률분포의 평균만으로 유일하게 결정되는 반면, 그 외의 확률분포는 평균과 분산을 동시에 고려하여야 유일하게 결정된다. 따라서, 후자의 경우가 보다 다양한 형태의 확률분포를 표현할 수 있음은 당연하다. 그러나, 전력시스템의 신뢰도 평가에서 일반적인 신뢰도 지수들은 확률과정을 모의한 결과의 평균값이므로 확률분포의 분산에는 무관하다. 예를 들어, 신뢰도 평가에서 '평균 연간정전횟수'의 산출만이 목적이라면 굳이 2개의 파라메타를 갖는 확률분포를 사용할 필요가 없으며 지수분포를 사용하는 것이 바람직하다.

한편, 신뢰도 지수뿐만 아니라 신뢰도 지수의 확률분포, 예를 들어 여러 해에 걸친 '년간 정전횟수의 분포'를 알고자 하는 경우에는 전력시스템 요소를 모델링한 확률분포의 형태가 중요하다. 즉, 요소 확률분포의 형태에 따라서 신뢰도 지수의 확률분포가 다르게 된다.

이상을 종합하여 볼 때, 다음의 결론을 내릴 수 있다.

1. 신뢰도 지수만을 산출하는 경우에는 지수함수를 사용하는 것이 바람직하다.
2. 신뢰도 지수와 함께 그 확률분포를 산출하는 경우에는 두 개의 파라메타를 갖는 확률변수를 사용하는 것이 바람직하다.
 - 2-1. 확률분포의 선택은 실제 분포에 대한 선지식에 의하여야 하며 감마분포와 와이블분포는 유사한 특징을 보이므로 두 분포 중에서 한 경우만 고려하여도 무방하다.
 - 2-2. 감마분포와 와이블분포중에서는 역변환법에 의하여 확률변수의 생성이 용이한 와이블분포를 사용하는 것이 바람직하다.

본 논문의 사례연구에서는 고장수리기간의 결정에 지수분포와 함께 와이블분포를 사용하여 신뢰도 평가를 수행함으로써 비지수분포로써 보다 정확한 신뢰도 평가가 가능함을

확인하였다.

3. 변전소 신뢰도 평가 방법

몬테카를로법을 이용한 전력시스템 신뢰도 평가의 샘플링 방법으로는 상태 샘플링(state sampling), 상태 지속시간 샘플링(state duration sampling), 시스템상태 천이 샘플링(system state transition sampling)의 세 가지를 고려할 수 있으나, 본 논문에서는 다양한 확률변수의 사용이 가능하고 빈도에 관계된 신뢰도 지수를 산출할 수 있는 상태 지속시간 샘플링을 사용하였으며 다음의 사항을 동시에 고려하였다.

- 능동고장(active failure) 과 수동고장(passive failure)
- 보수(maintenance)
- 고장 발생후의 정전구역 복구를 위한 스위칭 (switching action)
- 확률변수로써 지수분포와 와이블분포

한편, 본 논문에서는 지수분포와 와이블분포의 파라메타 결정에 역변환법을 사용하였으며, 해당 분포의 평균과 분산 정보를 이용하여 와이블분포의 파라메타를 결정하였다. 로그정규분포와 와이블분포는 모두 2개의 파라메타로 구성되며 역변환법으로써 확률변수를 생성하는 것이 용이하므로 우열을 가리기가 쉽지 않다. 따라서, 실제 신뢰도 평가를 수행하는 경우에는 모형화하려는 축적데이터를 대상으로 적합도 테스트(fitness test)를 수행하여 보다 적절한 분포를 선택하여야 한다. 이에 본 논문에서는 지수분포와 함께 지수분포를 일반화시킨 와이블분포만을 사용하여 사례연구를 수행하였다.

또한, 본 논문에서는 신뢰도 평가의 기준으로 다음의 신뢰도지수를 선택하였다.

- 연간 평균정전횟수 [회/년]
- 정전당 평균지속시간 [시간/회]
- 연간 평균정전시간 [시간/년]

한편, 본 연구에서는 동시에 발생할 수 있는 고장의 수를 2개로 고정하였는데, 이는 3가지 이상의 고장이 동시에 발생할 확률은 매우 희박하므로 신뢰도 지수에 그다지 영향을 미치지 않기 때문이다. 또한 보수는 계획에 의하여 지정된 시각에 수행된다고 하지 않고, 연간 지정된 수의 보수가 임의의 시각에 수행된다고 하였다. 그러나, 고장이 발생한 상태에서 변전소 구성요소의 보수를 시작하는 것은 비현실적이므로 모든 구성요소가 정상상태에 있는 경우에만 보수의 시작이 가능하도록 하였고, 또한 한 요소의 보수기간에는 타 요소의 보수가 시작되지 않는다고 하였다.

4. 사례 연구

4.1 대상시스템

2개의 전원점(송전선로), 2개의 부하점과 3개의 변압기로 이루어지는 가상 변전소의 신뢰도 해석에 본 연구에서 정리

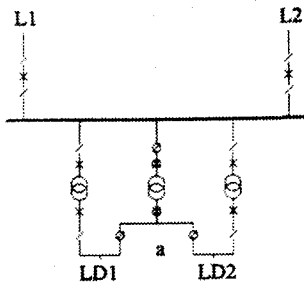


그림 2 모델 A

Fig. 2 Model A

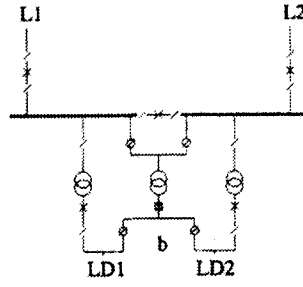


그림 3 모델 B

Fig. 3 Model B

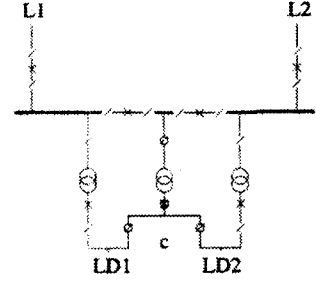


그림 4 모델 C

Fig. 4 Model C

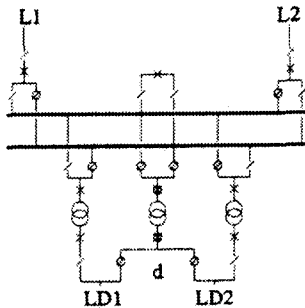


그림 5 모델 D

Fig. 5 Model D

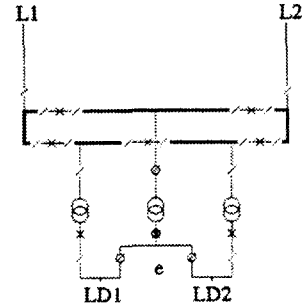


그림 6 모델 E

Fig. 6 Model E

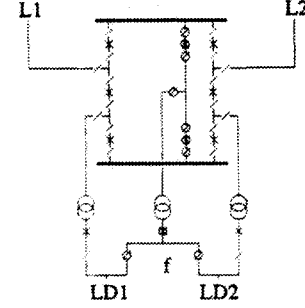


그림 7 모델 F

Fig. 7 Model F

한 방법을 적용하여 보았다. 본 사례연구의 대상 변전소는 참고문헌 [7]의 데이터를 거의 그대로 이용하였으며, 그림 2, 3, 4, 5, 6, 7로 표현된 여섯 경우의 변전소 모델에 대하여 신뢰도를 평가하였다. 그림 8은 그림 4의 모델 C를 상세히 나타낸 것으로 각 변전소 모델에서의 기호는 그림 8에서 정의된 바와 같다.

표 1은 참고문헌 [7]에서 제시한 변전소 각 구성요소의 신뢰도 정보로서 모선은 앞의 모델에서 굵은 선으로 표시한 부분만을 고려 대상으로 하였으며 스위치(disconnect switch)에서의 고장은 고려하지 않았다. 또한, 표 1에서 '수리기간 분산'은 참고문헌 [7]에는 없는 데이터인데 고장수리기간을 와이블분포로 모델링하기 위하여 본 연구에서 적당히 가정하였다.

표 1 변전소 구성요소의 신뢰도 정보

Table 1 Reliability information of the substation

구분 요소	능동고장율 [occ./yr]	수동고장율 [occ./yr]	스위칭 시간 [h]	MTTR [h]	수리기간 분산 [h]
차단기	0.01	0.01	1	12	6
모선	0.025	-	2	25	12
변압기	0.10	-	1	150	75
인입선	1.00	-	1	10	5

보수(maintenance)는 변압기와 차단기만을 대상으로, 변압기는 5년에 한번 꼴로 실시하며 한번에 10시간이 소요되고, 차단기는 10년에 한번 꼴로 실시하며 한번에 5시간이 소요된다고 가정하였다.

4.2 사례연구 결과

본 사례연구에서는 앞서의 6가지 변전소 모델을 대상으로 고장수리기간을 지수분포와 와이블분포의 확률변수로 구분하여 신뢰도를 평가하였으며 200000년 동안 시뮬레이션한 결과를 비교, 분석하였다.

고장수리기간을 지수분포와 와이블분포로 모델링한 경우의 신뢰도 지수를 표 2, 3, 4에 구분하여 정리하였다. 표 5, 6은 지수분포를 사용한 경우에 신뢰도 지수의 분포이며, 표 7, 8은 와이블분포를 사용한 경우에 신뢰도 지수의 분포이다. 사례연구의 대상 시스템은 부하 1과 부하 2에 대하여 완전히 대칭이므로 각 부하점의 신뢰도 지수는 동일하며 본 사례연구에서도 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 표 3~8에는 부하 1의 신뢰도 지수를 수록하였으나 부하 2의 신뢰도 지수라고 생각하여도 무방하다.

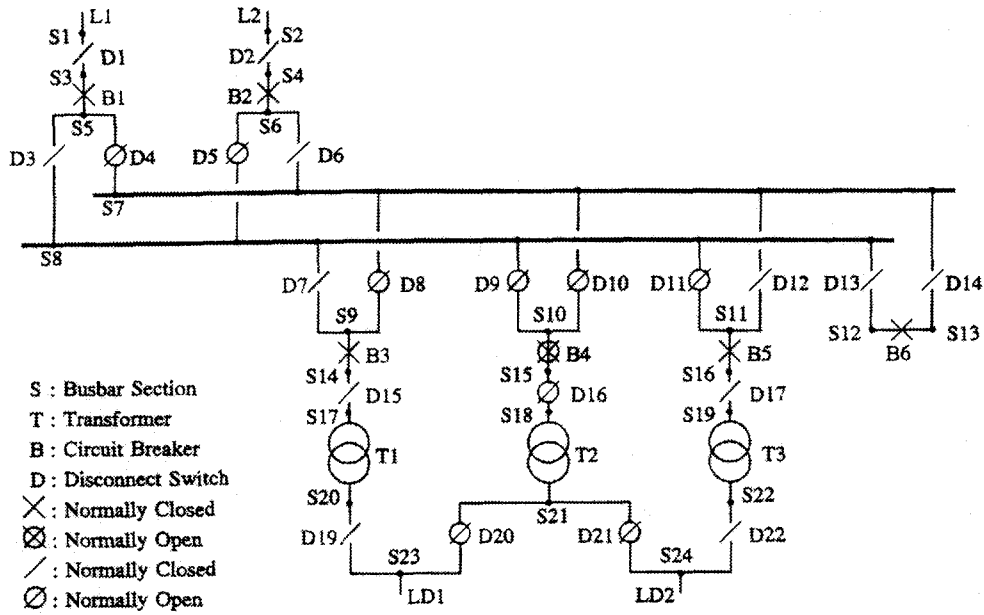


그림 8 모델 C의 상세도
 Fig. 8 Precise diagram of Model C

표 2 부하점 1의 연간 평균정전횟수 [회/년]
 Table 2 Loss of load frequency(LOLF) of Load 1 [occ./yr]

분포 \ 모델	A	B	C	D	E	F
지수분포	0.1947	0.1639	0.1644	0.2292	0.1651	0.1392
와이블분포	0.1958	0.1650	0.1652	0.2295	0.1638	0.1382

표 3 부하점 1의 정전당 평균지속시간 [시간/정전]
 Table 3 Average outage duration of Load 1 [hr/occ.]

분포 \ 모델	A	B	C	D	E	F
지수분포	4.3263	1.1544	1.1492	1.2190	1.1531	1.0000
와이블분포	4.3055	1.1532	1.1530	1.2167	1.1507	1.0000

표 4 부하점 1의 연간 평균정전시간 [시간/년]
 Table 4 Loss of load expectation(LOLE) of Load 1[hr/yr]

분포 \ 모델	A	B	C	D	E	F
지수분포	0.8421	0.1892	0.1889	0.2793	0.1904	0.1392
와이블분포	0.8429	0.1902	0.1905	0.2793	0.1885	0.1382

표 5 고장수리기간을 지수분포로 모델링한 경우에 부하점 1의 연간 정전횟수분포 [%]

Table 5 Distribution of LOLF of Load 1 when repair time is modeled by exponential distribution [%]

정전횟수 \ 모델	A	B	C	D	E	F
0회	82.278	84.898	84.853	79.501	84.752	86.983
1회	16.090	13.890	13.935	18.255	14.053	12.159
2회	1.528	1.137	1.137	2.082	1.132	0.819
3회	0.099	0.072	0.072	0.152	0.061	0.040
4회	0.006	0.002	0.003	0.009	0.003	0.001
5회이상	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000

표 6 고장수리기간을 지수분포로 모델링한 경우에 부하점 1의 정전당 지속시간분포 [%]

Table 6 Distribution of average outage duration of Load 1 when repair time is modeled by exponential distribution [%]

정전시간 \ 모델	A	B	C	D	E	F
0~1 시간	58.535	56.509	58.093	52.159	57.438	68.288
1~2 시간	27.711	40.458	39.085	43.744	39.581	31.712
2~3 시간	0.643	3.033	2.822	4.098	2.981	0.000
3~4 시간	0.601	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4~5 시간	0.406	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5시간 이상	12.104	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

표 7 고장수리기간을 와이블분포로 모델링한 경우에 부하점 1의 연간 정전횟수분포 [%]

Table 7 Distribution of LOLF of Load 1 when repair time is modeled by Weibull distribution [%]

모델 정전횟수	A	B	C	D	E	F
0회	84.147	84.761	84.763	79.510	84.891	87.111
1회	16.239	14.042	14.028	18.213	13.908	12.007
2회	1.513	1.140	1.142	2.099	1.138	0.838
3회	0.095	0.055	0.064	0.169	0.059	0.041
4회	0.006	0.003	0.004	0.009	0.004	0.003
5회이상	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000

표 8 고장수리기간을 와이블분포로 모델링한 경우에 부하점 1의 정전당 지속시간분포 [%]

Table 8 Distribution of average outage duration of Load 1 when repair time is modeled by Weibull distribution [%]

모델 정전시간	A	B	C	D	E	F
0~1 시간	59.154	56.859	57.021	52.549	57.511	68.809
1~2 시간	27.110	40.161	40.085	43.212	39.637	31.191
2~3 시간	0.000	2.979	2.894	4.236	2.853	0.000
3~4 시간	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
4~5 시간	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5시간 이상	13.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

사례연구결과로부터 각 모델의 특징을 다음과 같이 정리할 수 있다. 모델 A는 타 모델에 비하여 특히 '정전당 평균 지속시간'이 매우 길게 나왔는데, 이는 모델 A가 단일 모선으로 구성된 관계로 모선사고가 발생한 경우에 정전 복구를 위한 스위칭이 불가능하여 모선의 고장수리가 완료될 때까지 정전이 지속되기 때문이다. 모델 D는 타 모델에 비하여 '연간 평균 정전횟수'가 다소 많게 나왔는데 이는 본 모델을 구성하는 두 개의 모선이 서로 연결된 상태에서 운용되고 있으며 변전소 내의 많은 구성요소들이 모선에 바로 인접하여 있기 때문에 이들 중의 한 요소에 고장이 발생하여도 부하점에서의 정전을 피할 수 없기 때문이다. 모델 F는 타 모델에 비하여 비교적 많은 수의 차단기와 스위치로써 사고 발생의 여파를 줄일 수 있게끔 구성되었기에 신뢰도 지수가 타 모델에 비하여 우수하였다. 한편, 모델 B, C, E는 거의 비슷하고 무난한 신뢰도 특성을 보였다. 종합적으로 모델 F는 평균적으로 연간 약 8분의 정전이 예상되어 가장 우수하였으며, 모델 A는 연간 약 50분의 정전이 예상되어 가장 나쁜 결과를 보였다. 그리고 평균적으로 모델 D는 약 17분, 모델 B, C, E는 약 11분의 연간 정전시간이 예상된다.

신뢰도 평가에 몬테카를로 시뮬레이션을 도입함으로써 부수적으로 얻을 수 있는 정보는 표 5~8과 같은 신뢰도 지수의 확률분포정보이다. 이는 해석적인 방법으로는 얻기 힘든

결과로, 표 5, 6으로부터 모델 E의 경우에 연간 정전이 한번도 없을 확률이 약 85%정도 되며 정전이 발생한 경우에는 2시간 이전에 전력의 공급이 재개될 확률이 약 97%정도임을 알 수 있다.

한편, 고장수리기간을 지수분포로 모델링한 경우와 와이블분포로 모델링한 경우를 비교해 보면, 사고발생과 관련하여서는 두 방법에서 공통적으로 지수분포를 사용하였고, 또한 고장수리기간의 평균(MTTR)을 같은 값으로 하였으므로 신뢰도 지수는 동일하여야 한다. 이는 신뢰도 지수가 정전과 관련된 물리량들의 평균값이기 때문이다. 지수분포를 사용한 경우의 신뢰도지수와 와이블분포를 사용한 경우의 신뢰도지수인 표 2, 3, 4를 비교하면 두 방법이 상대오차가 최대 1% 미만인 거의 동일한 결과를 보였음을 알 수 있다.

표 5와 7을 비교하여 보면 '연간 정전횟수'에 있어서는 신뢰도 지수뿐만 아니라 그 분포 또한 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 고장수리기간의 확률분포는 사고의 발생 빈도에 영향을 미치지 않기 때문이다. 끝으로, 표 6과 8을 비교하여 보면, '정전당 지속시간'의 분포에 있어서는 모델 A외의 모든 경우에서 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 정전시간의 결정요인이 '고장난 요소의 수리기간'이 아닌 '스위칭에 소요되는 시간'이기 때문이다. 본 사례연구에서는 스위칭 시간을 모선 사고인 경우에는 2시간으로 그 외의 고장에 대해서는 1시간으로 고정하였으므로 대부분의 정전이 2시간 이내에 복구되며 중복 고장인 경우에만 2시간 이상 정전이 지속된다. 그러나, 모델 A에서는 모선 사고가 발생하였을 때, 정전의 복구에 소요되는 시간이 모선에 발생한 고장의 수리기간과 같게 되므로 고장수리기간의 확률분포에 영향을 받게 된다. 모델 A에서 정전이 2시간 이상 지속될 확률은 두 방법 모두 약 14%이었으며, 그림 9는 그 14%의 자세한 확률분포를 보여주고 있다.

그림 9를 살펴보면, 와이블분포를 사용한 경우에는 두 개의 정점이 존재하는데 그 중에서 높은 정점은 모선사고로 인한 정전시간을 반영한 것이고 낮은 정점은 중복사고의 영향인 것으로 생각된다. 반면에 지수분포를 사용한 경우에는 지수분포의 특성에 맞게 시간에 따라 정전시간의 확률밀도가 감소함을 알 수 있다.

이상을 종합하여 보면, 고장수리기간의 모델링에 있어서 지수분포보다 현실적으로 타당한 와이블분포를 사용하여도

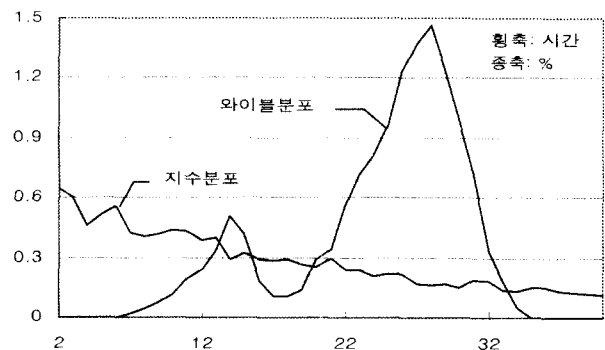


그림 9 모델 A에서 정전당 지속시간 확률분포의 비교
Fig. 9 Comparison of Probability Distribution of average outage duration of Model A

신뢰도 지수에는 아무런 영향을 미치지 않으나 스위칭으로써 정전구역의 복구가 불가능한 경우에는 정전시간과 관련된 신뢰도 지수의 확률분포에 영향을 미치게 된다. 그리고 이 경우에, 와이블분포가 고장수리기간을 지수분포보다 정확히 표현하므로 그림 9에서 와이블분포를 사용한 결과가 보다 정확하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 변전소의 신뢰도 평가와 관련하여 확률변수의 선택과 생성절차에 관하여 구체적으로 논하였으며, 기존의 여러 기법들을 이용하여 가상의 변전소를 대상으로 신뢰도를 평가하였다.

본 논문에서는 지수분포, 와이블분포, 감마분포, 로그정규분포를 대상으로 특징을 비교, 분석하여 고장발생과 관련된 확률변수로는 지수분포를 사용하는 것이 타당하지만 고장수리기간과 관련된 확률변수로는 와이블분포 또는 로그정규분포를 사용하는 것이 보다 현실적이라고 결론지었으며, 고장수리기간의 평균과 분산으로써 각 확률분포의 파라미터를 쉽게 결정할 수 있음을 보였다.

또한, 본 논문에서는 변전소의 신뢰도 지수로서 '년간 평균정전횟수', '정전당 평균지속시간', '년간 평균정전시간'을 사용하였으며, 능동고장, 수동고장, 구성요소의 보수상태, 정전구역의 복구를 위한 스위칭 등을 동시에 고려하여 상태지속시간 샘플링(state duration sampling)으로써 변전소의 신뢰도를 평가할 수 있는 종합적인 프로그램을 개발하여 사례연구에서 2개의 전원점, 3개의 변압기, 2개의 부하점으로 구성된 6경우의 모의 변전소를 대상으로 신뢰도를 평가하여 각 모델을 비교, 분석하였고, 고장수리기간과 관련된 확률변수로서 와이블분포를 사용함으로써 신뢰도 지수의 확률분포를 보다 현실에 가깝게 구할 수 있음을 확인하였다.

추후, 고장수리기간 뿐만 아니라 보수기간과 스위칭에 소요되는 시간을 현실성 있게 모델링하고, 차단기의 부동작을 동시에 고려하면 보다 정확한 신뢰도 지수와 그 확률분포의 획득이 가능하리라고 생각되며, 이를 위해서는 신뢰도 평가를 위한 실측 데이터의 축적이 매우 중요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] R. Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, New York, 1994.

[2] D. P. Gaver, F. E. Montmeat, and A. D. Patton, "Power System Reliability I - measures of reliability and methods of calculation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 83, No.7, pp. 723-737, July 1964.
 [3] Z. G. Todd, "A Probability Method for Transmission and Distribution Outage Calculation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 83, No.7, pp. 695-702, July 1964.
 [4] J. Endrenyi, "Three-State Models in Power System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 90, No.4, pp. 1909-1916, July 1971.
 [5] M. S. Grover and R. Billinton, "A Computerised Approach to Substation and Switching Station Reliability Evaluation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, No.5, pp. 1488-1497, Sept./Oct. 1974.
 [6] P. L. Noferi, L. Paris, and L. Salvaderi, "Monte Carlo Method for Power System Reliability Evaluation in Transmission and Generation Planning", Proc. Annual Reliability and maintenance
 [7] J. J. Meeuwsen and W. L. Kling, "Substation Reliability Evaluation Including Switching Actions with Redundant Components," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1472-1479, October, 1997.

저 자 소 개



김 광 원 (金 光 源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박사). 1996~현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 조교수.

Tel : (052) 259-2186

Fax : (052) 259-1686

E-mail : gwkim@mail.ulsan.ac.kr