

와이블 분포를 이용한 배전설비기기의 시변 고장률 분석

이희태* 김재철* 문종필* 박창호**
 * 송실대학교 ** 전력연구원

Analyzing of the Time varying failure rate of components of power distribution system using Weibull distribution

Lee Hee Tae* Kim Jae Chul* Mon Jong Fil* Park Chang Ho**
 * Soong Sil Univ ** KEPRI

Abstract - Distribution system reliability evaluation estimates by approach methods such as Makove modelling or Monte Carlo simulation, equation of state and failure rate that is on one basic data used to these assessment technique is described as probability of average value. because average failure rate equipment device is aged as time goes by but there is shortcoming that such used failure rate does not evaluate thing which is correct in reliability change hereafter. In this paper, failure rate displayed that apply aging to basis equipment device by passing time using Weibull distribution one of life evaluation method and for express aging of component from utility's failure database.

변화률 예측할 수 없는 단점이 있다. 이런 단점을 보완 하기 위해 고장률을 2가지 고장형태 구분하였으며, 각각의 특성에 맞는 분석도구를 이용하여 예측하였다[4].

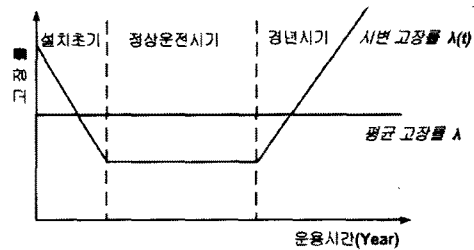


그림 1. 시변고장률과 평균 고장률

1. 서론

배전계통 시스템의 신뢰도 평가를 위해서는 고장률에 대한 정보가 중요하다. 신뢰도 평가를 위해서 앞으로의 고장률을 예측할 수 있다면, 미래의 신뢰도 기본지수뿐만 아니라 시스템 지수 및 배전계통 설비기기의 자산관리까지 가능하게 할 수 있는 중요한 변수이다. 일반적으로 신뢰도 평가에 대한 연구는 주로 평균 고장률과 지속 시간을 가정하여 수행되어 왔고 수명시간을 고려한 지속 시간이나 특히 고장률에 의해 야기되는 정전횟수를 반영하지 못하는 단점이 있었다[1,2].

배전자산의 고장자료를 이용하기 위해서는 기본적인 고장 정보가 필요하다. 기본적인 고장 정보에는 모든 배전 자산의 고장에 대하여 고장이 발생한 기기명, 고장이 발생한 시점, 기기가 설치된 시점, 고장의 원인, 수리 혹은 교체 등의 조치 유형, 조치에 소요된 시간, 지역적 특성 등이 포함된다. 또한 분석 대상 기간동안의 기기의 신규설치 규모와 유지보수를 위해 제거된 기기수, 그리고 연도별 설치 현황 등에 대한 정확한 정보가 필요하다.

그러나 현재 배전계통의 신뢰도 평가에 사용되고 있는 고장률은 설비기기의 수명에 관계없이 평균적인 값으로 평가하고 있지만 설비기기의 열화에 대한 고장률 변화를 평가하기 위해 고장관리나 수명관리에 널리 사용되고 있는 와이블 분포를 이용하여 가공선로의 고장률을 평가하였다. 또한 각 설비기기는 각각 가동시작 시간이 다르기 때문에 이를 보정하기 위해 카플란-마이어 추정법(Kaplan-Meier estimation)을 사용하였다[3,5].

시변 고장률 분석을 위해 고장형태를 수명이 다하여 고장난 열화고장과 수명과 관계가 없는 비열화고장 혹은 임의 고장으로 분류하였다. 예를 들면 자연열화나 부식에 의한 고장은 기기가 설치된 기간이 오래될수록 고장이 더욱 잘 일어날 수 있는 고장형태지만, 자연현상이나 외물접촉, 고의 및 과실 등에 의한 고장은 기기의 설치되어 있던 기간과는 상관없이 우연적인 현상에 의하여 고장이 발생하기 때문이다.

이 논문에서는 현재 한전 배전 설비기기의 고장통계자료를 바탕으로 시간에 근거한 고장률 변화를 평가하였다.

따라서 본 연구에서는 자연열화와 부식을 열화고장의 원인으로 포함하였고 자연현상이나 외물접촉, 고의 및 과실 등의 나머지 원인들은 임의고장의 원인으로 간주하였다. 그래서 배전자산들의 시변 고장률 분석을 위해 수집된 고장자료들을 고장원인에 따라 임의고장과 열화고장으로 분류한 다음 각각의 자료들에 대하여 분석을 수행하였다. 각 배전자산에 대한 최종적인 시변 고장률 값은 임의고장에 의한 시변 고장률과 열화고장에 의한 시변 고장률의 합으로 구했다. 왜냐하면 임의고장이라 함은 기기의 가동연수에 관계없이 항상 일정한 값으로 존

2. 와이블 분포

2.1 고장형태

배전계통 설비기기의 고장률 분석을 위해 그림 1과 같이 기존의 평균 고장률 개념과 시간이 지남에 따라 변화하는 고장률 개념을 도시하였다.

설비기기는 운영시간이 지남에 따라 기기노후 및 열화가 있기 때문에 평균적인 고장률로는 앞으로의 신뢰도

재하게 되고 각 자산의 시변 고장률은 열화고장에 의한 시변 고장률에 임의고장에 의한 시변 고장률이 일정한 부분만큼 더해지는 형태로 구할 수 있기 때문이다.

배전자산의 시변 고장률 분석을 정확하게 하기 위해서는 고장자료뿐만 아니라 고장나지 않은 기기들의 가동시간에 대한 정보도 필요로 하게 된다. 왜냐하면 시변 고장률 추정을 위해서는 모든 기기들의 총 가동시간에 대한 정보가 필요한데 총가동시간은 고장난 기기들의 고장날 때까지의 작동시간과 고장나지 않은 기기들의 실제 작동시간이 포함되기 때문이다. 그러나 실제로 고장나지 않은 기기들이 얼마동안 작동을 했는지에 대한 정보는 획득하기가 거의 불가능한 경우가 많다. 따라서 그러한 정보들에 대해서는 필요에 따라 합리적인 가정을 사용하여 분석을 수행하였다.

2.1.1 임의고장

임의고장은 기기의 가동시간과 상관없이 확률적으로 일정하게 고장이 발생하는 경우를 의미한다. 즉 임의고장에 의한 시변 고장률은 일정한 상수로 구하여 진다.

시변 고장률 분석에서 고장률이 상수인 경우에 사용되는 분포는 지수분포이며, 지수분포의 확률밀도함수 및 관련 모수들의 값은 다음과 같다.

평균 시변 고장률이 λ 인 경우,

$$\text{확률밀도함수} : f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$\text{확률분포함수} : F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$\text{신뢰성함수} : R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$\text{평균수명} : E(T) = MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

지수분포의 경우 시변 고장률의 추정식은 다음과 같다 [5].

$$\lambda_0 = \frac{\text{고장개수}}{\text{기기의 총가동시간}} \quad (5)$$

임의고장의 분석에서 고장개수는 고장자료를 바탕으로 하였고, 실제 작업자의 실수나 여러 가지 원인으로 인해 고장건수의 50%가 고장자료로 기록되는 것으로 가정하였다. 기기의 총가동시간을 계산하기 위해 2002년 12월 기준의 전국의 각 배전기기 수에 고장자료상의 고장시간의 평균을 곱하여 기기의 총 가동시간으로 가정하였다.

2.2.2 열화고장

가동시간에 비례하여 시변 고장률이 변하는 열화고장은 와이블 분포를 이용하여 분석하였다. 와이블 분포의 확률밀도함수 및 관련 모수들의 값은 다음과 같다[5].

$$\text{확률밀도함수} f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (6)$$

$$\text{확률분포함수} F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (7)$$

$$\text{신뢰성함수} R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (8)$$

$$\text{고장률함수} \lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (9)$$

$$\text{평균수명} E(T) = MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (10)$$

여기서 η 는 척도모수, m 은 형상모수이다. 와이블 분포는 m 의 값에 따라서 고장률 함수의 경향이 변하게 된다. 즉 $m=0$ 이면 와이블 분포는 지수분포와 같아지며 따라서 상수 시변 고장률을 가지게 된다. $m < 1$ 에 대해서는 고장률 함수는 t 의 감소함수로서 t 가 커짐에 따라 0에 접근하게 된다. $m > 1$ 에 대하여는 고장률 함수는 t 의 증가함수이다. 다양한 고장 패턴을 잘 나타내는 이러한 특성 때문에 와이블 분포는 고장률 분석 시 자주 사용된다.

임의고장의 경우 고장률을 바로 추정하였지만 열화고장의 경우는 평균수명을 추정한 후 평균수명의 역수를 구함으로써 평균 고장률을 추정할 수 있다.

열화고장의 일반적인 분석 절차는

- ① 데이터 수집
- ② 데이터 정렬(rank)
- ③ 와이블 확률지(weibull probability paper)에 데이터 도식화
- ④ 와이블 확률도(weibull probability plot) 해석의 순서로 이루어진다.

와이블 확률도를 만들기 위해 먼저 고장 시간을 기준으로 작은 것부터 정렬을 하고 각각의 자료에 대한 $F(t)$ 를 추정한 후 추세선을 추정해야 한다. 이때 적합도 검증(goodness of fit, r^2)을 통해 그 와이블 분포의 적합성을 결정할 수 있다.

와이블 확률지는 x축은 수명에 log를 취한 값이 표시되고, y축은 수명(t)까지 고장난 제품의 비율이 표시된다.

따라서 전체적인 시변 고장률에 대한 평가는 식 (11)과 같이 임의 고장과 열화고장의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\text{시변 고장률} : \lambda_{\text{total}}(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} + \lambda_0 \quad (11)$$

3. 사례연구

3.1 가공선로

배전계통에서 가장 많이 설치되어있는 가공선로를 가지고 향후 고장률을 예측하기위해 한전 고장데이터를 이용하여 각각 고장 원인별 고장횟수를 표 1과 표 2와 같이 정리하였다[6].

표 1. 가공 전선의 고장통계 1

원인별 설비별	설비 분량	모수 분량	자연 현상	고의 및 과실	외물 접촉
가공 전선	67	433	2148	858	1698

표 2. 가공 전선의 고장통계 2

원인별 설비별	진동 오동작	원인 불명	타사고 파급	기타	계
가공 전선	2	19	186	7	5418

표 1, 2의 가공선로에 대한 고장 자료는 1993년부터 2002년까지 수집이 되었으며 과거 10년간 총 5418건의 고장이 발생 보고 되었다. 가공선로의 경우 자연현상, 외물 접촉, 고의 및 과실의 순서로 고장원인의 비율이 높게 나타나고 있다.

3.1.1 가공선로 고장분석

가공선로의 임의 고장과 열화고장 고장통계자료를 바탕으로 다음과 같은 결과를 도출하였다.

표 3. 가공선로의 경년에 따른 고장률 변화값 I λ[f/year]

가공선로	0년	1년	2년	3년	4년	5년	6년
임의고장	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523
열화고장	0	0.00116	0.00419	0.00771	0.01156	0.01564	0.01993
합 계	0.00523	0.00639	0.00942	0.01294	0.01679	0.02087	0.02516

표 4. 가공선로의 경년에 따른 고장률 변화값 II λ[f/year]

가공선로	7년	8년	9년	10년	11년	12년	13년
임의고장	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523	0.00523
열화고장	0.02437	0.02896	0.03368	0.03851	0.04345	0.04849	0.05362
합 계	0.02960	0.03419	0.03891	0.04374	0.04868	0.05372	0.05885

표 5. 가공선로의 고장률과 와이블 모수

가공 전선	연간 평균 고장률			와이블 모수	
	임의고장	열화고장	합계	형상모수 (m)	척도모수 (eta)
	5.23E-03	5.26E-02	5.79E-02	2.21	257.41

위의 결과는 고장 보고율을 50%, 자산의 월간 증가율을 0.5~1%로 가정하고, 배전자산의 설치현황 자료와 2002년 12월 기준의 설비통계, 외국의 시변 고장률 분석 사례 등을 참조하여 분석한 결과이다.

시변 고장률 분석이 가능한 배전자산들에서 가공선로와 같은 와이블 모수 중 형상모수의 값이 모두 1보다 큰 값이 나오므로 열화고장이 존재한다고 볼 수 있다.

각 기기의 가동시작 시간이 다양하므로 카플란-마이어 추정법(Kaplan-Meier estimation)을 사용하였다. 고장난 기기를 포함한 모든 기기의 가동시간을 크기 순으로 나열한 다음 가동시간이 가장 긴 기기부터 순서를 매긴 후 $R_i = [(r_i - 1)/r_i] R_{i-1}$ 와 같은 반복식을 이용하여 각각 가동시간의 $F(t)$ 값을 추정하였다. (단 r_i 는 가동시간의 역순위) 와이블 확률도가 구해지면 와이블 분포의 모수를 추정하는데 형상모수 m 은 추세선의 기울기, 척도모수 η 는 추세선과 y절편의 값을 이용하여 추정하거나 63.2 백분위수를 추정치로 사용하였다.

열화고장 분석을 위해 와이블 확률도를 작성할 때 임

의 고장분석 시와 마찬가지로 실제 고장시간의 $F(t)$ 추정에 영향을 미치지 때문에 고장나지 않은 기기들의 가동시간에 대한 정보가 필요하다.

본 연구에서는 열화고장 분석 시 배전기기별 설치현황 자료를 이용하여 각 기기별 월간 증가량을 적절하게 반영하였고, 고장발생시 보고율을 0.5로 가정하여 분석을 수행하였다. 가공선로의 경우 설치 시부터 13년간 변화하는 고장률을 그림 2와 같이 나타내었다.

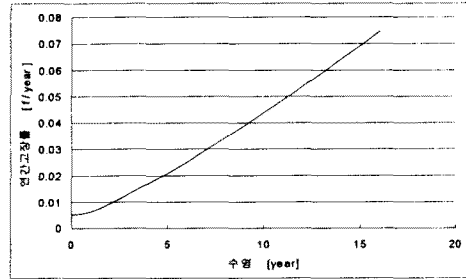


그림 2. 가공선로의 시변고장률 변화

4. 결 론

본 논문에서는 전통적인 신뢰도 평가[7]에 사용된 고장률의 개념을 설비기기의 열화를 적용하여 가공선로의 시간에 대한 고장률 변화를 평가하였다. 와이블 분포를 이용하였고, 가동시작 시간의 상이함을 카플란-마이어 추정법을 사용하여 보정하였다. 이 고장률은 배전계통의 유지보수 작업을 배제하였을 경우에 나타나는 고장률을 의미하며 유지보수작업 시 얼마만큼의 고장률이 변화할 수 있는지에 대한 연구가 이루어지면, 현재 계통의 상태에서 신뢰도 유지를 위해 배전설비기기의 유지보수 우선순위를 결정할 수 있는 기본 도구가 될 수 있을 것이라고 생각한다. 그리고 모든 설비기기에 대한 시변 고장률을 평가한다면 배전계통의 자산의 유지보수를 위한 토대 및 적절한 투자우선순위 결정에 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부지원 전력산업 기술기반 조성사업에 의한 한전전력연구원 지원으로 연구된 결과의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [1] Billinton, R. Ronald N. Allen, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984
- [2] Richard E. Brown, "Electric Power Distribution Reliability, ABB INC, 2002
- [3] 장인성, 김진규, "신뢰성 공학", 한울출판사, 2000
- [4] 이희태, 김재철, 문종필, 박현태, 박창호, 박상만, "신뢰도 측면에서 본 배전계통 최적투자 우선순위 결정" 대한전기학회 하계학술대회 논문지 A권
- [5] 배도선, 전영록, "신뢰성 분석", 마르케, 1999
- [6] 정전관리 통합 시스템 사용자 안내서
- [7] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems : Concepts and Techniques. New York ", Plenum, 1992.