

Reliability Evaluation of Power Distribution System Considering Maintenance Effects

문종필* · 손진근†
(Jong-Fil Moon · Jin-Geun Shon)

Abstract - In this paper, the Time-varying Failure Rates(TFR) of power distribution system components are extracted from the recorded failure data of KEPCO(Korea Electric Power Corporation) and the reliability of power distribution system is evaluated using Mean Failure Rate(MFR) and TFR. The TFR is approximated to bathtub curve using the exponential and Weibull distribution function. In addition, Kaplan-Meier estimation is applied to TFR extraction because of incomplete failure data of KEPCO. Also the reliability of the real power distribution system of Korea is evaluated using the MFR and TFR extracted from real failure data, respectively and the results of each case are compared with each other. As a result, it is proved that the reliability evaluation using the TFR is more realistic than MFR. In addition, it is presented that the application method at power distribution system maintenance and repair using the result of TFR.

Key Words : Time-Varying Failure Rates(TFR), Reliability, Power Distribution System, Mean Failure Rate(MFR),

1. 서론

정확한 배전계통 신뢰도 평가를 위하여 보다 정확한 고장률 추출은 필수적이다. 고장률이 정확하고 또한 미래의 고장률을 예측할 수 있다면, 전력계통의 신뢰도 추이(Trend)를 계산할 수 있게 되어, 신뢰도 지수가 향후 어떻게 변하는지 또는 어떤 기기가 계통 신뢰도에 악영향을 미치는지에 대한 분석이 가능해져, 향후 전력계통 설계 및 신뢰도 취약점을 분석하여 미래에 발생할 고장을 미연에 방지할 수 있게 된다. Wenyuan을 비롯한 몇몇 연구자들은 열화고장에 의하여 시간에 따라 고장률이 증가하는 시변고장률에 관하여 연구하여 왔다[1]. 그러나 열화고장률을 체계적으로 추출하여 실 배전계통에 적용한 사례는 많지 않은 실정이다.

본 논문에서는 배전계통 기기의 고장데이터로부터 고장률을 추출하였다. 사용한 고장률 데이터는 한국전력공사에서 축적된 고장데이터를 이용하였다. 시변고장률은 와이블 분포함수를 이용하여 욕조곡선(Bathtub curve) 형태로 추출하였다. 추출된 고장률을 이용하여 실제 배전계통에 대한 신뢰도 평가를 수행하였다. 신뢰도는 평균고장률과 시변고장률을 이용하여 평가하였으며 두 결과를 비교하여 분석하였다. 마지막으로, 각 기기의 고장률이 변할 때 계통 신뢰도에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 분석하였다. 분석한 결과를 토대로 배전계통 기기를 유지보수할 경우, 신뢰도 측면에서 어떠한 기기를

유지보수하는 것이 가장 효과적인지를 분석하고, 신뢰도 유지를 위하여 기기 교체시 신뢰도 개선효과를 나타내었다.

2. 배전계통 기기 고장률 추출

전력설비 고장률은 임의고장(Random failure)과 열화고장(Aging failure)으로 분리할 수 있으며, Bathtub 곡선으로 모의할 수 있다. 임의고장은 지수분포(Exponential distribution function)로 모델링 하였으며, 열화고장은 와이블 분포(Weibull distribution function)로 모델링하였다. 한편의 고장 데이터를 취득하고, 정렬하여 각 분포함수 별로 관련 모수들을 추정하여 고장률을 추출하였다. 자세한 고장률 추출 기법은 참고문헌 [2]에 설명되어 있다. 식 (1)~(5)는 지수분포함수, 식 (6)~(10)은 와이블 분포함수에 관련된 식을 나타낸다. 여기서, $f(t)$ 는 확률밀도함수, $F(t)$ 는 확률분포함수, $R(t)$ 는 신뢰도 함수, $E(t)$ 는 평균기대수명, λ 는 고장률을 각각 나타낸다. 또한 와이블 분포함수에서 m 은 형상모수, η 는 척도모수를 나타낸다.

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

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{3}$$

$$E(t) = MTTF = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

$$\lambda = \frac{\text{the number of failure}}{\text{the total operation time of component}} \tag{5}$$

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

* 정희원 : 충주대학교 첨단과학기술대 전기공학과 교수 · 공박

† 교신저자, 정희원 : 경원대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : shon@kyungwon.ac.kr

접수일자 : 2010년 4월 7일

최종완료 : 2010년 4월 26일

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

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

$$E(t) = MTTF = \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (10)$$

배전계통 가공선에 대하여 시간이 경과함에 따라 임의고장률, 열화고장률 및 합계를 그림 1에 표시하였다. 여기서 가로축은 년도를 나타내며 세로축은 고장률을 나타낸다. 평균고장률, 시변고장률 및 시변고장률의 와이블 모수를 표 1에 나타내었다.

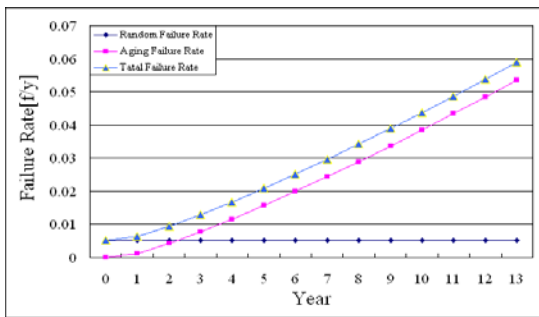


그림 1 가공선의 시변고장률 추이
Fig. 1 TFR of overhead line.

표 1 가공선에 대한 고장률 및 와이블 모수

Table 1 Failure rate and Weibull parameter of overhead line.

평균고장률	임의고장률 λ_0 [/yr]	5.23E-03
	열화고장률 $\lambda_A(t)$ [/yr]	5.26E-02
	합계 $\lambda(t)$ [/yr]	5.79E-02
와이블 모수	형상모수 m	2.21
	철도모수 η	257.41

3. 배전계통 신뢰도 평가

배전계통 기기별로 추출한 평균 및 시변고장률을 이용하여 실제 배전계통의 신뢰도 평가를 수행하였다. 그림 2는 신뢰도 평가를 수행하기 위한 실제 배전계통 모델을 나타낸다.

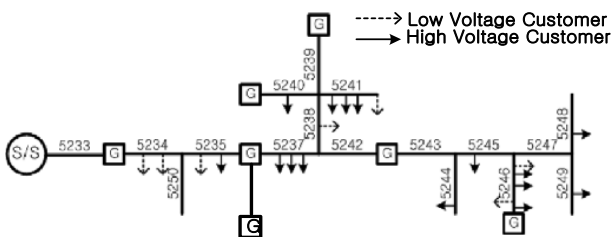


그림 2 신뢰도 평가를 위한 실제 배전계통 모델
Fig. 2 The real model for reliability evaluation.

3.1 신뢰도 모델 및 데이터

그림 2의 모델에서 직접 신뢰도를 평가할 수는 없다. 계통 신뢰도를 평가하기 위해서는 우선 실제 계통을 신뢰도 모델로 변환하여야 한다. 본 논문에서는 실제 계통을 신뢰도 모델로 변환하기 위한 기본 규칙을 설정하였으며, 그 규칙은 다음과 같다.

규칙 1) 차단기(CB)를 기준으로 설정한다.

규칙 2) 선로, 스위치, 애자의 고장률

- 선로(가공선로 및 지중선로)

: 시변고장률/km × 실제 길이(km)

- 스위치

: 시변고장률 × 스위치 개수

- 애자

: 시변고장률 × 애자 개수

규칙 3) 컷아웃스위치(COS), 주상변압기(PTR)

- COS : 병렬 분기선의 보호기기

- PTR : COS와 직렬 연결 기기

규칙 4) 부하점(Load Point)

- 특고압수용가 : 배전선로와 직접연결

- 고압 및 저압수용가 : PTR 뒤쪽에 연결

규칙 5) 절환 스위치

- 다른 배전선로와 연결(상시 개방)

- 절체율은 1

이와 같은 규칙을 적용하여 변환한 배전계통 신뢰도 모델은 그림 3과 같다. 즉, 개폐기를 기준으로 선로, 스위치, 애자의 고장률을 합하여 등가처리하였고, 부하점은 저압 및 고압에 따라 PTR, COS연결 또는 배전선로 직접연결로 처리하였다. 신뢰도 평가를 위한 데이터를 표 2와 3에 나타내었다.

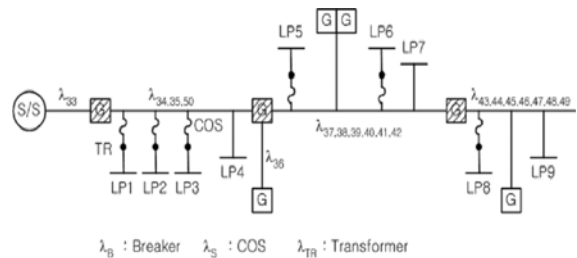


그림 3 배전계통 신뢰도 평가 모델

Fig. 3 Reliability evaluation model.

표 2 수동 및 자동선로의 복구시간

Table 2 Restoration time of manual/automatic distribution line.

내용	수동선로	자동선로
1. 고장구간 탐색	3 min/km	1 min/event
2. 고장점 탐색	3 min/km	3 min/km
3. 부하절체 순서 결정	5 min	2 min
4. 부하절체	5 min	1 min
5. 차단기 조작	5 min	5 min

표 3 LP별 수용가 수

Table 3 The number of customers.

LP	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	Total
수용가 수	50	60	47	3	70	65	2	50	3	350

3.2 신뢰도 평가

그림 3 모델에 대하여 신뢰도 평가를 수행하였다. 신뢰도 평가는 현재시점에 대하여 기본신뢰도 지수와 추가신뢰도 지수[3-5]를 산출하였다. 산출한 기본신뢰도 지수 결과는 표 4에 나타내었다. 여기서, λ 는 LP당 연간 평균고장횟수, r 은 1회정전당 평균정전(복구)시간, U 는 연간 고장시간을 나타낸다.

표 4 LP별 기본신뢰도 지수

Table 4 The load point indices.

Load Point	λ [f/y]	r [h/f]	U [h/y]
LP1	0.9103	1.0429	0.9493
LP2	0.9103	1.0429	0.9493
LP3	0.9103	1.0429	0.9493
LP4	0.8603	1.0347	0.8901
LP5	0.9103	2.2121	2.0137
LP6	0.9103	2.2121	2.0137
LP7	0.8603	2.2720	1.9545
LP8	0.9103	2.1777	1.9823
LP9	0.8603	2.2355	1.9231

추가 신뢰도 지수는 식 (11), (12)에 나타내었다 여기서, SAIFI는 System Average Interruption Frequency Index로서 시스템 평균 정전 횟수를 나타내고, SAIDI는 System Average Interruption Duration Index로 시스템 평균 정전 시간을 나타낸다.

$$SAIFI = \frac{\sum_{k=1}^9 \lambda_k N_k}{\sum_{k=1}^9 N_k} = 0.9092 \text{ f / year} \tag{11}$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{k=1}^9 U_k N_k}{\sum_{k=1}^9 N_k} = 1.5210 \text{ h / year} \tag{12}$$

4. 사례연구

4.1 시변고장률을 이용한 신뢰도 평가

시변고장률을 이용한 신뢰도 평가 결과를 그림 4에 나타내었다. x축은 현재시점부터 11년이 지나갈 때까지를 나타내고, y축은 SAIFI, SAIDI지수를 나타낸다. 이 결과는 앞의 3장에서 나타낸 평균고장률을 이용하여 계산한 신뢰도 값과 비교하여 시간이 지남에 따라 신뢰도가 변하는 값을 보여줄 수 있으므로 보다 현실적이다. 평균고장률을 이용할 경우에는

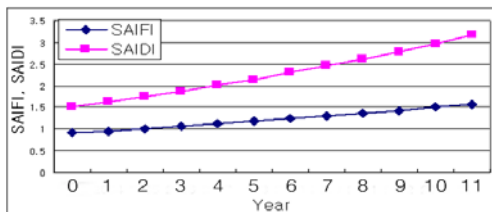
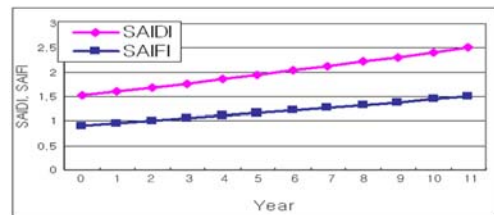


그림 4 연간 SAIFI, SAIDI 추이
Fig. 4 SAIFI and SAIDI trend for year.

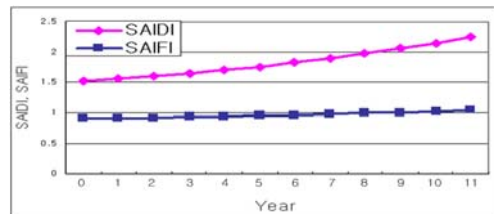
기본신뢰도 지수 및 추가신뢰도 지수가 일정한 값으로 나타나게 되지만, 시변고장률을 이용할 경우에는 그림과 같이 시간이 지남에 따라 증가하는 형태를 나타내게 된다.

4.2 유지보수 및 수리에 따른 신뢰도 영향 평가

전력기기를 유지보수하게 되면 그 기기의 고장률은 낮아지게 된다. 본 논문에서는 참고문헌 [6]에 따라 배전계통 기기에 대한 유지보수의 영향을 고려하여 신뢰도를 평가하였다. 그림 5는 가공선로와 지중선로의 고장률이 시간이 지남에 따라 증가함에 따라 모델 계통의 신뢰도 지수를 분석한 결과이다.



(a) 가공선로(For overhead line)



(b) 지중선로(For cable)

그림 5 SAIFI, SAIDI 민감도 분석

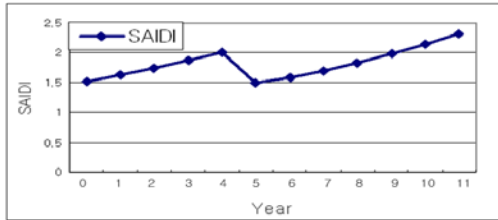
Fig. 5 SAIFI, SAIDI sensitivity analysis.

즉, 다른 모든 기기들의 고장률은 고정시킨 후, 한 가지(가공선로 또는 케이블)만의 고장률을 변화시키며 신뢰도 지수를 계산한 결과이다. 이와 같은 분석을 통하여 어떤 기기가 계통신뢰도에 많은 영향을 미치는지와 그 기기가 계통신뢰도에 얼마나 많은 영향을 미치는지를 분석할 수 있다. 따라서 이러한 결과는 배전계통 기기의 유지보수를 결정할 때 기본적인 데이터로 활용할 수 있다.

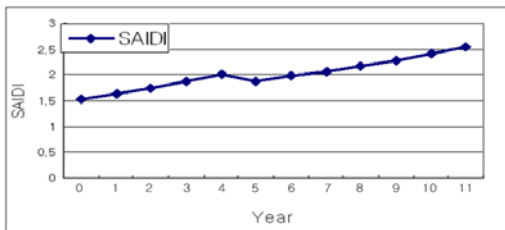
그림 5 (b)를 보면, 지중선로는 SAIFI에 미치는 영향이 적은 것을 알 수 있다. 즉, 지중선로는 시간이 지나서 고장률이 증가하더라도, 계통의 SAIFI지수는 크게 변하지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 지중선로는 SAIDI에는 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 해석으로, 가공선로는 지중선로보다 SAIFI, SAIDI에 영향이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 계통에 유지보수를 수행할 경우 케이블 보다는 가공선로를 유지보수하는 것이 신뢰도 측면에서 보다 유리한 것으로 판단할 수 있다.

만약 SAIDI를 2이하로 제한하고 싶다면, 그림 4에 보면, SAIDI는 4년 후에 2보다 증가하게 되므로, 3년 후에 유지보수를 수행하여 SAIDI를 2이하로 낮추어야 한다. 본 논문에서는 가공선로 또는 지중선로를 교체하는 유지보수 방법을 선택하였다. 그림 6은 (a)가공선로를 교체할 경우, (b)지중선로를 교체할 경우에 대하여 SAIDI의 변화를 분석한 결과를

나타낸다. 앞에서 분석한 바와 같이 가공선로를 교체하는 것이 지중선로를 교체하는 것보다 SAIDI 지수에 효과가 큰 것으로 나타났고, 배전계통의 모든 기기들에 대하여 이와 같은 분석을 통하여 유지보수를 결정할 수 있을 것이다.



(a) Overhead line



(b) Cable

그림 6 각 기기 교체시 SAIDI 추기

Fig. 6 SAIDI trend for replacing the component.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 평균고장률이 아닌 시변고장률을 축적된 고장데이터를 이용하여 추출하였다. 시변고장률은 지수분포와 와이블분포 함수를 이용하여 추출하였다. 추출한 고장률을 이용하여 실제 배전계통에 대한 신뢰도 분석을 수행하였다. 평균고장률을 사용하는 것보다 시변고장률을 사용하게 되면 미래 신뢰도 예측이 가능하여 향후 신뢰도가 얼마나 악화될지를 분석할 수 있음을 보여주었다. 또한 시변고장률을 이용한 신뢰도 분석을 통하여 배전계통 기기의 유지보수에 어떻게 응용할 수 있는지를 분석하였으며 민감도 분석을 통하여 각 기기가 계통 신뢰도에 미치는 영향을 분석하여 교체 및 유지보수를 통하여 신뢰도를 적정 수준으로 유지할 수 있는 방법을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 2010학년도 경원대학교 지원에 의한 결과임

참 고 문 헌

[1] Wenyuan Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, Aug. 2002.
 [2] 문종필, 이희태, 김재철 외, "배전계통 설비의 시변 고장률 추출", 대한전기학회 논문지 제 54A권, 11호, pp.

548-556, 2005년 11월.

[3] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability evaluation of power systems(secondedition), NewYork: Plenum Press,1996.
 [4] R. Billinton and W. Li, Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods, NewYork: Plenum Press, 1994.
 [5] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability evaluation of engineering systems - concepts and techniques, NewYork: Plenum Press, 1983.
 [6] Richard E. Brown, "Electric Power Distribution Reliability", ABB INC, 2002

저 자 소 개



문 종 필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업(공학박사). 2009년 ~현재 충주대학교 전기공학과 전임강사

Tel : 043-841-5146

Fax : 043-841-5140

E-mail : moon@cjnu.ac.kr



손진근 (孫珍勗)

1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 1992~1995 현대중공업(주) 기전연구소 주임연구원. 2002. 2~2003. 2 (한국과학재단) 일본 가고시마대학 전기공학부 Post-doc. 2009. 1~2010. 2 Michigan State University Visiting Scholar. 현재, 경원대학교 전기공학과 교수.

Tel : 031-750-5711, Fax : 031-750-5354

E-mail : shon@kyungwon.ac.kr