

배전계통에서 부하특성을 고려한 신뢰도평가에 관한 연구

박 현석, 노 대석
한국기술교육대학교
e-mail: dsrho@kut.ac.kr

Reliability Assessment Considering Load Characteristics in Distribution Systems

Hyeonseok Park, Daeseok Rho
Korea University of Technology and Education

요 약

This paper deals with the analytical approach for the reliability assessment in radially operated distribution systems. The approach can estimate the expected reliability performance of distribution systems by a direct assessment of the configuration of the systems using the reliability indexes such as NDP(Non-Delivery Power) and NDE(Non-Delivery Energy). The indexes can consider the number and configuration of the load, but can not consider the characteristics of the load which is the one of the most important factor in the investment cost for the distribution systems. Therefore, This paper presents the new indexes considering the expected interruption cost for the load section and shows the effectiveness by simulating at the model systems.

1. 서 론

신뢰도 개념은 사실상 대부분의 엔지니어 분야에 적용된다고 해도 과언이 아닐 정도로 넓은 분야에서 사용되고 있다. 신뢰도는 어떤 계통의 성능에 대한 척도를 나타내며, 이러한 척도는 대상 계통의 성능 척도를 만족시키고, 여러 대안들에 대한 비교 결과들을 제시해 주며, 경제적인 결정을 하는데 도움을 주는 것이다. 즉, 신뢰도의 궁극적인 목적은 “시스템이 충분히 신뢰성이 있느냐”, “어떤 대안이 사고를 적게 유발하는가”, “시스템의 성능을 향상시키기 위하여 어느 부분에 돈을 투자할 것인가” 와 같은 질문에 답을 제공해 주는 것이다. 일반적으로 배전계통의 신뢰도 해석은 계통 계획담당자의 중요한 도구로서 간주되어 왔다. 즉, 이것은 서비스에 대한 적절한 품질을 확인하고, 또한 계통의 여러 확장계획(투자비와 손실 고려)들 가운데 최적의 대안을 선정하

는데 필수적인 것으로, 전력회사에서는 배전계통의 신뢰도 해석에 점점 더 많은 관심을 가지고 있는 실정이다.

신뢰도 평가수법은 시뮬레이션 수법과 해석적인 수법으로 크게 두 개의 그룹으로 나눌 수 있다. 먼저, 전자는 매우 탄력적인 수법이나, 계산시간이 많이 걸리고 정도 면에서 문제점이 있으나, 발전계통과 복합계통, 변전소의 신뢰도 평가에 성공적으로 적용되어 왔다. 후자의 해석적인 수법에서는 네트워크 모델이 배전계통의 신뢰도 평가에서 가장 보편적인 수법으로 사용되어 왔는데, 그 이유로서는 이 수법의 간편성과 배전계통의 구성도가 네트워크 모델과의 유사성에서 기인하기 때문이다. 그러나, 이 수법은 사고분리나 부하복구, 복합적인 보호협조와 같은 중속적인 사건들을 쉽게 다룰 수 없다는 한계성을 가지고 있어서, 이의 보완 모델에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다^{[1]-[3]}.

본 논문에서는 기존의 해석적인 수법에서 여러 신

되도 지표가 주로 수용가의 수와 지형적인 영향만을 고려한 단점을 보완하기 위하여, 어느 특정지역의 수용가가 실제로 정전되는 경우를 상정하여 수용가의 정전비용을 계산하여, 이에 의한 영향을 신뢰도 지표 속에 나타내도록 하였다. 즉, 정전비용에 따른 수용가의 중요도를 고려하기 위하여, 수용가의 정전비용 특성을 이용한 새로운 신뢰도 평가지수를 정의하여, 양적인 면에서 뿐만 아니라 질적인 면에서도 가장 경제적으로 신뢰도를 향상시킬 수 있는 특정 계통이나 지역, 설비 등을 선택할 수 있는 새로운 신뢰도 평가수법을 제안하였다. 또한, 부하특성을 고려하지 않은 기존의 평가수법과 부하특성(정전비용 특성)을 고려한 새로운 평가수법에 대하여, 모델 배전계통에 대한 시뮬레이션을 수행하여 새로운 평가수법의 유용성을 확인하였다.

2. 신뢰도 평가 수법

방사상 배전계통에 있어서, 기본적인 신뢰도 지수(Reliability Index)로서는 대상 계통(또는 지역)에 대한 사고율 기대치(Expected Failure Rate)와 평균 정전시간, 연간 정전시간의 기대치라는 3가지의 지수가 일반적으로 사용되고 있다. 또한, 신뢰도를 향상시키는 척도를 비용의 효과 측면에서 평가하기 위하여, 추가적으로 연간 공급지장전력(NDP)과 연간 공급지장에너지(NDE)라는 두 개의 지수가 사용되고 있다.

2.1 기존의 신뢰도 지수

신뢰도 지수의 기대치(평균치)는 다음 식과 같이 계산된다.

$$f = \sum_i \lambda_i \quad (= \lambda) \quad (\text{정전횟수/년}) \quad (1)$$

$$\Delta T = \sum_i \lambda_i K_i \quad (= U) \quad (\text{정전시간/년}) \quad (2)$$

$$r = \frac{\Delta T}{f} \quad (\text{정전시간/정전횟수}) \quad (3)$$

- 여기서, f : 연간 정전횟수
- ΔT : 연간 정전지속시간
- r : 평균 정전시간(정전횟수당 지속시간)
- λ_i : 구성요소 i 에 대한 연간 사고횟수의 기대치
- K_i : 구성요소 i 에 대한 평균 복구시간
(절체시간)

이들 지수들은 일정한 값이 아니라 확률분포에 근

거한 기대치(또는 평균치)이며, 장기간에 걸친 평균치를 나타낸다.

한편, 각 부하구간에 대한 NDP와 NDE의 기대치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$NDP = P f \quad (\text{년간 정전전력}) \quad (4)$$

$$NDE = P \Delta T \quad (\text{년간 정전전력량}) \quad (5)$$

여기서, P : 각 부하구간의 부하크기(kW)

한편, 정전횟수는 지수 분포를 따른다고 가정되며, 상관 분포계수는 사고 통계치로부터 구해진다. 해석적인 계산에 대하여 주어진 분포에 의하여 복구시간을 나타내는 데에 문제점이 있으므로, 여기서는 통계적 분포에 근거한 다음의 개념을 이용한다.

$$F_k = \frac{\sum_i F_{ri}(t) \cdot \lambda_i + \sum_j F_{kj}(t) \cdot \lambda_j}{\sum_i \lambda_i + \sum_j \lambda_j} \quad (6)$$

여기서, $F_k(t)$: 부하구간 k 의 정전지속시간의 누적 분포치

$F_{ri}(t)$: 구성요소 i 의 복구시간의 통계 누적분포치

$F_{kj}(t)$: 구성요소 j 의 절체시간의 통계 누적분포치

λ_i : 부하구간 k 에 대하여 복구시간(정전시간)을 유발하는 구성요소 i 의 연간 사고횟수의 기대치

λ_j : 부하구간 k 에 대하여 절체시간(정전시간)을 유발하는 구성요소 j 의 연간 사고횟수의 기대치

2.2 기대 정전손실을 이용한 정전비용 산출 알고리즘

정전에 의한 손실 비용은 정전 지속시간과 정전 발생시각, 정전의 크기, 정전 지역의 부하특성 등에 의하여 결정된다. 일반적으로, 다음 식과 같이 정전 지속시간 t 의 이차식으로 근사화시킬 수 있다.

$$F_{ku}(t) = (at_k^2 + bt_k + c) L_{ku} \quad (7)$$

- 단, $F_{ku}(t)$: 정전 비용(원/kW),
- t_k : 정전 지속시간(Hour)
- L_{ku} : 정전지역의 부하크기(kW)
- k : 정전구간
- u : 시간대 번호

한편, 정전구간 k 에 있어서, 정전 계속시간 $t \sim t + \Delta t$ 사이에서의 복구 확률은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_k(t, t + \Delta t) = r_k e^{-r_k t} \Delta t \quad (8)$$

단, $p_k(t)$: 정전 복구확률
 r_k : 평균 정전 복구시간

따라서, 전체 고찰시간에 대하여 정전 발생시각에 대한 기대치인 기대 정전 손실비용(Expected Interruption Cost)은 다음 식과 같이 정식화 할 수 있다.

$$F_{tot} = \sum \int_{U_s}^{U_e} A_{ku} \int_0^{\infty} p_k(t) F_{ku}(t) dt du \quad (9)$$

단, F_{tot} : 총 기대 정전 손실비용
 $U_s \sim U_e$: 전체 고찰시간
 A_{ku} : 각 구간에 대하여, 시각 u 에서의 정전 발생확률

$$\int_0^{\infty} p_k(t) dt = 1, \quad \int_{U_s}^{U_e} A_{ku} du = 1$$

2.3 새로운 신뢰도 지수

기존의 신뢰도 지수인 NDP와 NDE는 계통의 구성 상태나 부하의 특성을 고려할 수 없기 때문에, 여기에서는 식 (10)과 같이 대상구간 부하의 중요도(각 구간의 정전비용에 대한 전체 구간의 정전비용에 대한 백분율)를 계산하여, 이것을 기존의 신뢰도 지수에 가중치의 형태로 곱하여, 식 (11)과 식 (12)와 같이 새로운 신뢰도 지수들을 정의한다.

$$W_k = \sum \frac{F_k}{F_{tot}} \times 100\% \quad (10)$$

$$NNDP_k = W_k \cdot NDP_k \quad (11)$$

$$NNDE_k = W_k \cdot NDE_k \quad (12)$$

단, F_k : k구간의 정전비용
 F_{tot} : 전체구간의 정전비용
 W_k : k구간 수용가의 중요도(가중치)
 $NNDP_k, NNDE_k$: 수정된 NDP와 NDE

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 모델 계통 및 신뢰도 데이터

본 논문에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 다음과 같은 모델 계통과 신뢰도 데이터를 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

- ① 그림 1, 표 1과 같은 모델 배전계통 및 계통 구성데이터를 상정하였다.
- ② 표 2와 같은 영구 사고의 통계치와 평균치를 신뢰도 산정을 위한 입력데이터로 사용하였다. 이것은 평균 사고율의 기대치와 복구시간을 나타낸 것으로, 절체 시간은 개폐기와 제어장치의 형태에 따라 달라지며, 공급지역의 선로길이와 지역적, 기후적인 특성에 따라 달라진다. 따라서, 절체 시간은 각 개폐기의 정전시간이나 계통의 평균치로 주어지게 된다.
- ③ 정전손실비용의 부하특성 데이터는 표 3과 같다. 여기서 b, c 계수 값은 간략화를 위하여 0으로 가정하였다.

3.2 신뢰도 모델 및 시뮬레이션 결과

여기서는 다음과 같이 두개의 신뢰도 모델을 상정한다.

- (1) 신뢰도 I 모델 : 부하 특성(중요도)을 고려하지 않은 기존의 신뢰도 평가수법
- (2) 신뢰도 II 모델 : 정전비용 특성을 고려한 새로운 신뢰도 평가수법

상기의 신뢰도 모델에 근거하여 각 구간별 신뢰도 지수를 산정한 결과는 다음과 같다.

- ① 신뢰도 I 모델에 근거하여 각 구간별 신뢰도 지수를 산정한 결과는 표 4와 같다. 이 표에서와 같이, NDE가 가장 큰 지역을 순서대로 나열하면 C₄, C₆, C₂, ... 지역이다. 따라서 기존의 신뢰도 지수에 의하면 계통 항상 투자 계획 1순위는 C₄로 결정된다. 그러나, 실제적으로 C₄지역은 농촌지역이므로 부하의 중요도는 낮아 비합리적임을 알 수 있다.
- ② 신뢰도 II 모델에 의하여 생성된 신뢰도 지수는 표5와 같다. NNDE를 크기순으로 나열하면, 표 4와는 달리 C₂, C₆, C₃, ... 지역이 되며, 투자 우선순위가 부하의 중요도가 높은 공장지역이 높게 나타나 합리적임을 알 수 있다.

표 1. 모델계통 구성 데이터

구역	내역	부하특성	피크부하 기 (kW)	공 장 (km)	개폐기 수	주상 변압기수	비 고
C1	상업지역		500	4	2	10	
C2	공장지역		1200	7	2	24	
C3	상업지역		800	13	3	16	
C4	주거지역		1000	15	3	20	
C5	주거지역		500	29	4	10	
C6	공장지역		1000	17	4	20	

(주상변압기 수는 50KVA를 기준용량으로 계산하고 퓨즈는 구분개폐기에 포함)

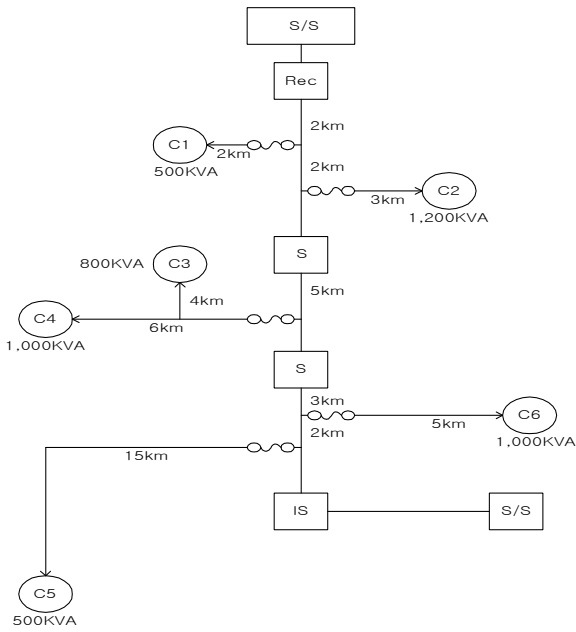


그림 1. 22.9kV 방사상 모델 배전계통

표 2. 영구사고에 대한 사고통계치(평균치)

구성요소	사고율 (회수/년간)	복구시간 (시간/사고당)	비고
가공선로	0.06	0.02	
차단기	0.017	0.06	
구분개폐기	0.014	0.015	
주상변압기	0.01	0.03	

(주) 선로는 km당 값이며, 그 외는 각 기기당 값임.

표 3. 각 부하지역의 정전비용 계수

	a ₁ (오프피크시 간대)	a ₂ (피크 시간대)	a ₃ (중부하 시간대)
농촌지역	0.002	0.007	0.002
상업지역	0.002	0.025	0.01
공장지역	0.01	0.03	0.02

표 4. 각 구간별 신뢰도 지수(신뢰도 I 모델)

지수 \ 구간	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
f (정전횟수/년간)	0.371	0.691	0.985	1.145	1.899	1.279
ΔT (정전시간/년간)	0.00903	0.01683	0.01464	0.02544	0.03945	0.02805
r (평균정전시간)	0.02433	0.02436	0.01486	0.02222	0.02077	0.02193
NDP(kW)	185.5	829.2	788	1145	949.5	1279
NDE(kWh)	4.515	20.196	11.712	25.44	19.725	21.93
총NDP	5176.6					
총NDE	103.518					

표 5. 각 구간별 신뢰도 지수(신뢰도 II 모델)

지수 \ 구간	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
NNDP	13.2	440.3	90.4	47.6	19.8	282.7
NNDE	0.3	10.7	1.3	1.1	0.4	4.8

4. 결 론

본 논문에서 제안한 새로운 신뢰도 지수는 각 지역의 부하특성을 고려하기 위하여 정전비용의 가중치가 계산되어진 값이므로 기존의 지수보다 합리적인 값을 확인할 수 있었다. 앞으로는 실 계통을 대상으로 여러 경험치와 통계치들을 개발 모델에 적용하는 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 노대석 외 : “신에너지전원이 도입된 배전계통에서의 신뢰도평가 방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회, 추계학술회 논문집, 2007. 11.
- [2] G. Kjolle and Kjell Sand, ‘REL RAD - An Analytical Approach for Distribution System Reliability Assessment,’ IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 809-814.
- [3] R. Brown, S. Gupta, S.S Venkata, R.D. Christie, and R.Fletcher, ‘Distribution System Reliability Assessment Using Hierarchical Markov Modeling,’ IEEE PES Winter Meeting, altimore, MD, January, 1996.