

보호시스템을 고려한 배전계통의 신뢰도 평가

김 세호¹, 좌 종근², 최 병윤³, 조 시형⁴, 김 정구⁵

¹제주대 전기공학과, ²전력연구원, ³한전 서울연수원, ⁴한전 전남지사

Distribution System Reliability Evaluation Considering Protective System

S. H. Kim¹, C. K. Jwa², B. Y. Choi³, S. H. Cho⁴, J. G. Kim⁵

¹Cheju Univ., ²Kepeco Research, ³Kepeco Seoul Training, ⁴Kepeco Chonnam Direct Office

[Abstract]

To evaluate the quality of a system or its ability to perform a required function, it is necessary to quantify the reliability of that system. The reliability techniques are based on the concept of expected failure rate and average-outage-duration method. For each load point, the expected failure rate, average outage duration and average annual outage time are evaluated. This paper deals with the reliability evaluation for distribution system including the protection relay system. In evaluating the reliability, it suggests a method for the analysis of protective system reliability, that provides a probabilistic measure of the success of the protective apparatus to perform its intended function. The analysis shows the dependency of success on the reliability of many components, and the way this reliability may be enhanced by redundancy.

1. 서론

배전계통의 투자나 운용계획을 합리적으로 세우기 위해서는 적절한 신뢰도의 유지에 수반되는 설비투자나 계통운용 비용, 전력공급의 제한으로 인한 손실비용 등을 감안한 신뢰도의 개념이 필요하다.[1] 특히 배전계통은 전력계통의 말단에 위치하고 있어 수용가에 직접 전력을 공급하는 특징을 갖고 있으며 송전계통 이상으로 복잡화되어 가는 경향이다. 이와같은 현상은 도심부에서 그 정도가 심화되고 있으며 최근에는 변전소 용지나 배전선 루트를 확보하는 데에도 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 전력회사는 계통의 계획 및 운용에 있어서 수용가에게 적절한 신뢰도를 기준으로 정전없는 양질의 전력을 공급하기 위하여 기존 설비의 신뢰도를 정확히 평가하여야 한다.

배전계통의 신뢰도를 평가하는 연구는 1970년대 후반 Chang[2]이 배전계통의 설계의 타당성을 평가하기 위해 비용 신뢰도 지수(cost reliability index)와 비용효과 지수(cost effectiveness ratio)를 도입한 이후 많은 연구가 이루어지고 있다. 그후 1989년 Lawler[3]는 배전자동화에 따른 신뢰도 평가를 위해 자동화 전후의 정전비용의 차를 평가하였고 1992년 Warren[4]은 일시적 정전(번개나 수목 등의 접촉 등)을 감소시켜 신뢰도 지수를 산정한 효과에 대해 고찰하였으며 1995년 Chen[5]은 배전계통의 신뢰도를 평가하고 이를 이용하여 변전소의 증설대신 배전선의 신설을 제안하는 등 최근에 까지 계속해서 연구가 활발히 이루어지고 있다.

현재까지의 신뢰도에 관한 연구에서는 보호계전시스템을 무시하거나 하나의 개폐기로 단순화시켜 해석하였으나 보다 정확한 평가를 위해 본 논문에서는 보호계전시스템을 구성하는 각 요소들을 고려하여 평가하고자 한다.

2. 신뢰도 개념

신뢰도를 평가할 때에는 다음의 기호가 일반적으로 사용된다.

$$R = P\{\text{시스템의 성공}\} = \text{신뢰도} \quad (1a)$$

$$Q = P\{\text{시스템의 실패}\} = 1 - R = R' \quad (1b)$$

$$p_i = P\{\text{요소 } i \text{의 성공}\} = r_i \quad (2a)$$

$$q_i = P\{\text{요소 } i \text{의 실패}\} = r_i' \quad (2b)$$

여기서 P{사건}는 사건이 일어날 확률을 의미한다.

$$A = \{\text{사건 : 요소 } A \text{의 성공}\} \quad (3a)$$

$$A' = \{\text{사건 : 요소 } A \text{의 실패}\} \quad (3b)$$

$$P(A) = P\{A \text{ 성공}\} = p_a \quad (4a)$$

$$P(A') = P\{A \text{ 실패}\} = q_a \quad (4b)$$

2.1 직렬시스템

요소 A_1, A_2, \dots, A_n 가 직렬로 연결된 시스템에 대해 모든 요소 A_i 가 독립적이라 하면 전체 시스템은 모든 요소가 성공적으로 기능을 수행할 때 성공하게 되며 그 때의 신뢰도는 다음과 같이 주어진다.

$$R = P(A_1)P(A_2) \dots P(A_n) = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i \quad (5)$$

직렬시스템에서는 모든 요소가 정상적으로 동작하여야만 시스템이 성공적으로 기능을 수행할 수 있으며 하나의 요소라도 실패하면 시스템의 동작은 실패하게 된다.

2.2 병렬시스템

병렬로 연결된 시스템의 신뢰도는 성공보다는 실패시 확률을 이용하여 계산하는 것이 쉽게 표현이 된다.

m개의 요소가 병렬로 연결된 시스템은 모든 요소가 동시에 실패할 때만 시스템의 동작이 실패하게 되어 다음과 같이 표현된다.

$$Q = R' = q_1 q_2 \dots q_m \quad (6)$$

$$R = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^m q_i \quad (7)$$

식(5)-(7)의 직렬이나 병렬로 연결된 시스템의 신뢰도로부터 직렬-병렬, 병렬-직렬 등의 여러 가지 형태로 이루어진 시스템에 대한 신뢰도를 표현할 수 있다.

2.3 동작불량(실패)의 형태

어떤 요소가 정상적으로 동작하지 않는 동작불량에는 두가지 형태가 있다. 하나는 필요한 경우에도 동작이 되지 않는 경우로서 오부동작(operational failure, 동작실패)으로 표현되며 다른 하나는 필요하지 않은 경우 동작하는 것으로서 오동작(security failure, 안전실패)이라 한다.

두 개의 동일한 요소 A_1 과 A_2 가 병렬로 연결된 시스템에 대해 동작불량의 두가지 형태를 고려해 보자.

q_o 를 오부동작 확률, q_s 를 오동작 확률이라 하면 전체 시스템

템의 오부동작 확률은 다음과 같다.

$$Q_0 = q_0^2 \quad (8)$$

오동작에 대해서는 하나의 요소라도 오동작을 일으키면 전체 시스템이 오동작을 하는 결과이므로 직렬형태가 되어 다음과 같이 표현된다.

$$Q_s = 1 - R_s = 1 - p_s^2 = 1 - (1 - q_s)^2 = q_s(2 - q_s) \quad (9)$$

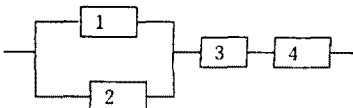
오부동작과 오동작의 원인에 의한 병렬 시스템의 동작불량 확률과 신뢰도는 식 (8)과 (9)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$Q = R' = Q_0 + Q_s = q_0^2 + q_s(2 - q_s) \quad (10)$$

$$R = 1 - R' = 1 - q_0^2 - q_s(2 - q_s) \quad (11)$$

두가지 형태의 동작불량에 대한 로직은 그림 1과 같다.

그림 1로부터 두 개의 요소가 동시에 오부동작을 일으키거나 어느 하나의 요소가 오동작을 일으키는 경우 시스템은 정상적으로 동작을 하지 않는 동작불량 상태가 된다.



1, 2 : 오부동작 3, 4 : 오동작

그림 1. 두가지의 동작불량에 대한 로직 다이어그램

3. 보호시스템의 신뢰도 모델

보호시스템의 동작불량은 동작신뢰도 면에서 오부동작과 오동작으로 나누어 생각할 수 있다. 오부동작은 차단요소의 불량이나 계전기의 부적당한 정정이 원인이며 오동작은 계통은 정상인데 보호범위 밖의 계통사고에 대해 동작하여 불필요한 차단을 일으키는 것으로서 계통운용에 여유가 있는 경우에는 큰 장애가 되지 않는 경우가 많다.

보호시스템의 신뢰도를 평가하기 위하여 다음과 같은 동작불량 확률을 정의하였다.

q_{oi} = 사고가 보호범위 안에 발생하였을 때 동작해야 할 장치 i 의 오부동작 확률

q_{si} = 계통에 사고가 발생하지 않았거나 보호구역 밖에서의 사고에 대해 동작할 장치 i 의 오동작 확률

Q_{oi} = 부시스템 i 의 오부동작 확률

Q_{si} = 부시스템 i 의 오동작 확률

그림 2에 간단한 부시스템의 여러 형태를 표시하였다.

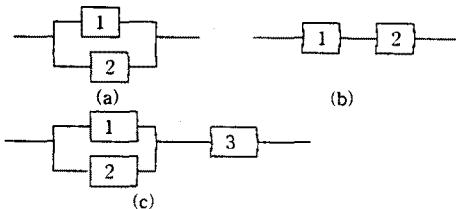


그림 2. 여러 가지 형태의 부시스템

그림 2(a)의 병렬로 연결된 보호계전기에 대해 각 계전기의 오부동작 확률을 q_{o1} , q_{o2} 라 하면 두 계전기가 모두 동작불량일 때 부시스템이 정상적인 기능을 수행하지 못하므로 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{oa} = q_{o1} q_{o2} \text{ if } q_{o1} \neq q_{o2} \quad (12)$$

$$= q_o^2 \text{ if } q_{o1} = q_{o2} = q_o$$

식 (12)에서 q_{o1} , $q_{o2} < 1$ 이므로

$$Q_{oa} = q_o^2 < q_o \quad (13)$$

병렬로 연결함으로써 Q_{oa} 즉 부시스템이 오부동작할 확률은

감소된다.

오동작 확률 Q_{sa} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_{sa} = 1 - (1 - q_{s1})(1 - q_{s2}) \quad (14)$$

$$= q_{s1} + q_{s2} - q_{s1} q_{s2} \text{ if } q_{s1} \neq q_{s2}$$

$$Q_{sa} = 1 - (1 - q_s)^2 \quad (15)$$

$$= q_s(2 - q_s) \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

식 (15)에서 $q_s < 1$ 이므로

$$(2 - q_s) > 1, Q_{sa} > q_s \quad (16)$$

이다. 즉 병렬처리함으로써 오동작의 확률은 증가될 수 있다. 그림 2(b)의 직렬연결에 대해서는 다음의 식이 성립한다.

$$Q_{sb} = q_{s1} q_{s2} \text{ if } q_{s1} \neq q_{s2} \quad (17)$$

$$= q_s^2 \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

$$Q_{ob} = q_{o1} + q_{o2} - q_{o1} q_{o2} \text{ if } q_{o1} \neq q_{o2} \quad (18)$$

$$= q_o(2 - q_o) \text{ if } q_{o1} = q_{o2} = q_o$$

식 (17)과 (18)로부터 직렬연결시 단일 요소인 경우에 비해 오부동작의 확률은 증가하고 오동작의 확률은 감소한다. 그림 2(c)의 직병렬 연결인 경우에는 그림 2(a)와 (b)로부터 다음의 표현식을 구할 수 있다.

$$Q_{sc} = Q_{sa} Q_{sb}$$

$$= (q_{s1} + q_{s2} - q_{s1} q_{s2}) q_{s3} \text{ if } q_{s1} \neq q_{s2} \quad (19)$$

$$= q_s(2 - q_s) q_{s3} \text{ if } q_{s1} = q_{s2} = q_s$$

$$Q_{oc} = Q_{oa} + Q_{ob} - Q_{oa} Q_{ob}$$

$$= q_{o1} q_{o2} + q_{o3} - q_{o1} q_{o2} q_{o3} \text{ if } q_{o1} \neq q_{o2} \quad (20)$$

$$= q_o(1 - q_{o3}) + q_{o3} \text{ if } q_{o1} = q_{o2} = q_o$$

식 (19)와 (20)으로부터 부시스템이 오동작할 확률은 구성되는 요소의 오동작 확률이 많이 좌우되지만 계전기 병렬, 차단기 직렬인 일반적인 보호시스템에서는 차단기가 오동작을 일으킬 확률이 적기 때문에 부시스템의 오동작은 큰 영향을 미치지 않는다.

그러나 오부동작인 경우에 대해서는 직렬 연결되는 차단기의 오부동작이 큰 영향을 미친다. 따라서 그림 3(c)와 같은 직병렬 보호시스템인 경우 신뢰도는 계전기의 실패보다는 차단기의 실패에 많은 영향을 받는다.

일반적으로 보호계전시스템의 신뢰도 평가시에는 식 (19)와 (20)으로 알 수 있는 바와 같이 계전기와 차단기를 모두 고려하기 보다는 차단기의 고장요인이 크게 작용하기 때문에 주로 차단기의 동작불량 정보만으로 취급하는 경우가 많다.

4. 배전계통의 신뢰도 평가

수용가에게 양질의 전력을 계속적으로 공급하기 위해서는 현재 계통상태에 대한 신뢰도를 정확히 평가하고 신뢰도 증진방안 등을 마련하여야 한다. 신뢰도는 계통을 구성하는 요소들에 대한 고장률 등의 데이터를 이용하여 평가하는데 현재까지는 보호시스템을 고려하지 않거나 하나의 스위치 등으로 단순화시켜 평가하였다.

배전계통을 보호하기 위해 사용하는 보호장치로는 차단기(CB), recloser, sectionalizer 등이 있으며 이와같은 보호장치는 계속부분, 전원부분, 계전기부분, 트립코일, 차단부분 등으로 이루어져 있다. 이런 구성요소는 직병렬 형태로 보호장치라는 하나의 장치속에 포함되어 있어 단순한 하나의 스위치 등으로 단순화시키기 보다는 3장에서 다룬 직병렬 형태의 부시스템으로 처리하여야 보다 정확한 신뢰도를 평가할 수 있다.

또한 보호계전시스템의 동작 신뢰도 향상을 위해서는 사용 부품의 신뢰도를 높이는 것 뿐만 아니라 오부동작이나 오동작의 확률을 줄이기 위한 다중화(redundancy)의 적용이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 보호계전시스템을 보다 정확히 평가하고 다중화를 통한 신뢰도의 증진을 3장에서 다룬 이론을 이용하여 달성하고자 한다.

일반적으로 배전계통의 신뢰도 평가는 수용가 말단인 부하 지점의 시스템 수행능력을 평가하는 것으로서 신뢰도 산출에 사용되는 기본 신뢰도 지수로는 각 부하지점의 평균사고율 (λ), 평균정전시간(평균 복구시간, r), 년정전시간(U) 등을 사용한다. 따라서 각 부하지점의 기본 신뢰도 지수들 토대로 전체적인 시스템 지수들 산출한다.

계통을 구성하는 요소들에 대한 데이터는 다음과 같이 평가 된다.

0 스위치 등 요소들의 고장율

$$\lambda = \frac{m}{NT} \quad [1/year] \quad (21)$$

여기서 m : 어떤 요소의 고장 횟수
N : 고장에 노출된 유니트의 수
T : 연간 시간

0 선로의 고장율

$$\lambda = b \epsilon \quad [1/year] \quad (22)$$

$$b = \frac{m}{LT} \quad [1/km \text{ year}] \quad (23)$$

여기서 m : 고장횟수

L : 고장에 노출된 요소의 전체길이

T : 연간 시간

b : km당 연간 고장횟수

ϵ : 관심있는 어떤 선로의 길이

0 요소의 복구시간

$$r = \frac{m \sum_{i=1}^m t_i}{m} \quad [\text{hour}] \quad (24)$$

여기서 t_i : i번째 요소의 고장에 대한 복구시간

m : 고장횟수

n개의 구간으로 나누어지는 임의의 부하지점 k에 대한 기본 신뢰도 지수의 산출식은 다음과 같이 표현되며 표현식은 계통을 간략화시키는 데 이용될 수 있다.

$$\lambda_{sys} = \sum_{i \in F(k)} \lambda_i \quad [\text{failure/year}] \quad (25)$$

$$r_{sys} = \frac{\sum_{i \in F(k)} \lambda_i r_i}{\lambda_{sys}} = \frac{U_{sys}}{\lambda_{sys}} \quad [\text{hours/failure}] \quad (26)$$

$$U_{sys} = \lambda_{sys} \times r_{sys} = \sum_{i \in F(k)} \lambda_i r_i \quad [\text{hours/year}] \quad (27)$$

여기서 λ_i : 구간의 선로고장율 [failure/km/year]

r_i : i 구간의 평균복구시간[hours]

식(25)는 부하지점 k의 평균고장율을 평가하는 수식으로 각 구간의 사고에 대하여 부하지점 k에 정전사고를 미치는 모든 구간 구성요소들의 고장율을 누적하여 구하게 된다. $i \in F(k)$ 은 n개의 구간에 대한 사고시 정전사고를 발생하게 하는 모든 구간 i를 의미한다.

식 (25)나 (26)은 계통을 구성하는 많은 요소들이 존재할 때 같은 지역내에 있는 요소들은 직렬로 연결되어 있으므로 등가의 요소로 대체시킬 수 있는 수식으로 부하지점과 공급 지점 사이의 각 요소들의 고장율과 복구시간이 계산되어져 있다면 즉시 등가의 하나의 요소로 대체될 수 있으며 식(25)와 (26)을 계속해서 이용함으로써 계통을 간략화 시킬 수 있다.

시스템 신뢰도 지수는 전체 계통의 장래 수행 능력, 계통의 동작 등을 해석하기 위해 사용하는 지수로서 각 부하지점의 기본 신뢰도 지수와 계통정보(최대부하량, 수용가 호수 등)를 토대로 계산된다. 시스템 신뢰도 지수로는 시스템 평균 정전횟수(SAIFI : System Average Interruption Frequency Index), 시스템 평균 정전시간(SAIDI : System Average Interruption Duration Index), 수용

가 평균 정전시간(CAIDI : Customer Average Interruption Duration Index), 평균 공급가용률(ASAI : Average Service Availability Index), 평균 공급 불가용률(ASUI : Average Service Unavailability Index), 공급부족 에너지(ENS : Energy Not Supplied Index) 등이 있다.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad [\text{interruption/cus..year}] \quad (28)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad [\text{hours/customer..year}] \quad (29)$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad [\text{hours/cus..interruption}] \quad (30)$$

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad (31)$$

$$= 1 - \frac{SAIDI}{8760}$$

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (32)$$

$$ENS = \sum L_i U_i \quad [\text{kwh/year}] \quad (33)$$

여기서 N_i : 부하지점 i의 수용가수

L_i : 평균부하

5. 결론

배전계통의 사고가 수용가의 신뢰도에 가장 큰 비중을 차지하므로 신뢰성있는 전력을 공급하기 위해서는 사고나 고장시에 고장구간을 신속하게 분리하고 건전구간에 전력공급을 계속하여야 한다. 이러한 목적을 위한 보호장치의 신뢰도를 보다 정확히 표현하기 위해 보호시스템의 구성요소에 대한 오부동작과 오동작의 개념을 이용하였으며 다중화를 통해 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 장차 각 구성 요소에 대한 정확한 데이터를 취득하여 구체적인 사례연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Turan Gonen, Electric power distribution system engineering, Mcgraw-hill, Inc. 1986.
- [2] N. E. Chang, "Evaluate distribution system design by cost reliability indices", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-96, no.5, pp.1480-1487, September/October 1977.
- [3] J.S. Lawler, L.D. Monteem et al, "Impact of automation on the reliability of the ATHENS utilities board's distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.4, no.1, pp.770-778, January 1989.
- [4] C. M. Warren, "The effect of reducing momentary outages on distribution reliability indices", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1610-1617, July 1992.
- [5] R. Chen, K. Allen, R. Billinton, "Value-based distribution reliability assessment and planning", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 421-429, January 1995.
- [6] R. Billinton, G. Lian, "Station reliability evaluation using a Monte Carlo approach", IEEE trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1239-1245, July 1993.
- [7] R. N. Allan, M. G. Da Silva, "Evaluation of reliability indices and outage costs in distribution systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 413-419, February 1995.