

## 배전시스템의 해석적 신뢰도 평가를 위한 실제적인 적용방법

\*김 재철, \*한 성호, \*이 현화, \*선 개인<sup>o</sup>, \*\*장 정태  
\*송실대학교 전기공학과, \*\*한국전력공사 기술연구원

### A practical approach for analytical reliability evaluation of distribution systems

\*Jae-chul Kim, \*Seong-ho Han, \*Gain Sun<sup>o</sup>, \*Hyun-hwa Lee, \*\*Jeong-tae Jang  
\*Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, \*\*KEPCO Research Center

#### ABSTRACT

This paper presents a practical approach to evaluate the reliability indices of electric distribution systems. The use of reliability evaluation is placed with the framework of distribution system planning. In this paper, the reliability model is based on an analytical method, connecting component failure to load point outage each section. Five case studies are reported in the paper. These are to study the effect of varying failure rates and repair times on distribution feeders. The results of a study on sample system are presented in this paper.

#### 1. 서론

전력계통의 계획 및 운용에 있어서 전력회사는 시스템과 장비의 경제적 운용을 위해 적절한 신뢰도 기준으로 정진없는 양질의 전력공급을 제공해야한다. 따라서 수용가에게 신뢰성 있는 전력을 공급하기 위해서는 시스템 유지보수공사 등 적절한 신뢰도 비용을 투자하여 구성요소의 사고를 방지해야 한다. 배전시스템의 신뢰도 모델 및 평가는 복잡하고 변화가 심한 구조상 특성과 구성요소의 설비투자비가 높은 이유로 송변전계통분야에 비해 많은 관심을 끌지 못하였다. 그러나 수용가 사고통계[1]에 따르면 배전계통의 고장확률이 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 효율적인 설비투자계획을 위하여 많은 연구가 요구됨을 반영해 준다.

공급신뢰도는 선로공장에 비례하는 선로사고율, 부하절체 능력 및 복구시간, 선로의 분할 및 연계 등에 따라 크게 좌우된다[2]. 따라서, 신뢰도평가에 있어서 모델구성요소의 사고율과 복구시간(유지보수시간 및 부하절체시간)은 데이터의 정확성 여부에 따라 계산결과에 많은 영향을 준다.

본 논문에서는 지금까지 발표된 배전시스템 신뢰도 평가에 대한 전반적인 방법을 분석하고 이를 토대로 실제통에 적용하여 사례검토하였다. 평가방법으로는 사고율과 복구시간의 통계적 분포를 반영한 가정조건을 기초로 하여 부하지점별로 계산하는 해석적 접근법[3,4]을 사용하였다.

특히 실제통 도면을 배전전산용 패키지인 CADPAD[5]를 이용하여 컴퓨터에 입력하고 작성된 도면화일을 토대로 신뢰도 모델구성 및 신뢰도지수 데이터를 산정하여 평가에 활용하였다. 신뢰도 모델은 개폐기를 중심으로 구간을 설정하여 구간별 선로사고율과 복구시간을 산정하여 부하지점(load point)별로 평가하였으며, 또한 이들 파라미터를 증감시키면서 시스템 전체에 미치는 영향을 검토하였다.

#### 2. 해석적 신뢰도 평가

##### 2-1. 평가개념의 정의

배전시스템의 해석적 신뢰도 평가에 있어서 우선적으로 요구되는 것은 해석을 위한 몇가지 가정조건들인데 예를들면 사고구간의 독립성, 부하절체한계, 계통의 운전조건 등을 말한다.

다음단계로는 신뢰도 모델을 표현하는 구성요소의 결정이며, 이들이 선정되면 사고통계분석을 바탕으로 구성요소의 신뢰도 데이터 즉 사고율( $\lambda_i$ ), 복구시간( $r_i$ )을 산정한다.

이를 위해서는 기본적으로 실제통 도면, 시스템 데이터, 수용가 데이터, 부하데이터 등이 필요하며 구성요소의 신뢰도 데이터를 토대로 부하지점의 신뢰도 기본지수인 연간사고율(failure rate), 년평균정전시간(outage duration), 년정전시간(annual Unavailability)를 계산한다.

전체적인 공급신뢰도의 해석적 평가절차는 그림 1과 같다.

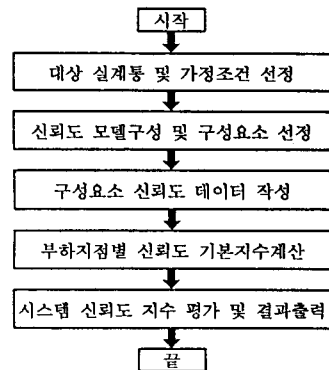


그림 1. 해석적 신뢰도 평가 순서도

##### 2-2. 신뢰도 지수 계산[3,4,6]

배전시스템의 신뢰도 평가지수는 광범위 지역에 걸쳐 각종 수용가가 존재하므로 일반적으로 평균치로 표현된다. 기본지수로는 연간사고율  $L\lambda_i$ , 년평균정전시간  $Lr_i$ , 년정전시간  $U_i$ 가 사용되고 있다[7].

그림 2는 간선의 구분개폐기에 따라 구간수가  $n$ 개이고 연계선로가  $m$ 개인  $n$ 분할 $m$ 연계 모델선로를 표현한 것이며 각 구간마다 부하지점  $L_i$ 가 포함된 경우를 가정한 것이다. 따라서 각 부하지점의 기본지수는 식(1), (2), (3)와 같이 계산된다.

공장과 선로사고율 데이터를 나타냈으며, 신뢰도모델을 바탕으로 각 구성요소의 복구시간을 해석하고 구간별 데이터를 나타내었다. 여기서, 음영처리된 구간은 부하지점이 있는 구간을 의미한다.

표 2. CASE 1에 대한 각 구간별 신뢰도 데이터

| 구간 수 | 선로 공장 [km] | 선로 사고율 [f/yr.km] | 복구 시간 [hrs] | 구간 수 | 선로 공장 [km] | 선로 사고율 [f/yr.km] | 복구 시간 [hrs] |
|------|------------|------------------|-------------|------|------------|------------------|-------------|
| 1    | 0.348      | 0.01044          | 2.7         | 16   | 0.094      | 0.00282          | 2.7         |
| 2    | 0.120      | 0.00360          | 2.7         | 17   | 0.135      | 0.00405          | 2.7         |
| 3    | 0.030      | 0.00090          | 2.7         | 18   | 0.258      | 0.00774          | 2.7         |
| 4    | 0.261      | 0.00783          | 30.0        | 19   | 0.015      | 0.00045          | 2.7         |
| 5    | 0.375      | 0.01125          | 2.7         | 20   | 0.072      | 0.00216          | 2.7         |
| 6    | 0.696      | 0.02088          | 30.0        | 21   | 0.030      | 0.00090          | 2.7         |
| 7    | 0.030      | 0.00090          | 2.7         | 22   | 0.096      | 0.00288          | 2.7         |
| 8    | 0.600      | 0.01800          | 2.7         | 23   | 0.111      | 0.00333          | 2.7         |
| 9    | 0.024      | 0.00072          | 2.7         | 24   | 0.054      | 0.00162          | 2.7         |
| 10   | 0.098      | 0.00343          | 5.0         | 25   | 0.086      | 0.00301          | 2.7         |
| 11   | 0.383      | 0.01341          | 5.0         | 26   | 0.528      | 0.01848          | 5.0         |
| 12   | 0.021      | 0.00074          | 2.7         | 27   | 0.810      | 0.02835          | 5.0         |
| 13   | 0.262      | 0.00917          | 5.0         | 28   | 0.519      | 0.01817          | 5.0         |
| 14   | 0.131      | 0.00459          | 5.0         | 29   | 0.459      | 0.01377          | 2.7         |
| 15   | 0.193      | 0.00676          | 5.0         | 계    | 6.839      | 0.22033          | 151.3       |

CASE 1에 대한 각 구간별 신뢰도데이터를 토대로 부하지점으로 계산된 신뢰도 기본지수 결과는 표 3과 같다. 표에서 복구 시간과 선로장이가 긴 부하지점의 신뢰도기본지수가 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있다.

표 3. CASE 1에 대한 부하지점별 신뢰도 지수 결과

| 부하지점 | 최대부하 [kW] | 수용가 수[호] | 사고율 ( $\lambda$ ) [f/yr] | 평균정전 시간( $r$ ) [hrs/yr] | 년정전 시간( $U$ ) [hrs/f] |
|------|-----------|----------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| L1   | 1,943     | 3,735    | 0.226325                 | 3.644478                | 0.824837              |
| L2   | 666       | 1,280    | 0.238325                 | 5.091793                | 1.213502              |
| L3   | 84        | 162      | 0.256325                 | 2.857655                | 0.732489              |
| L4   | 170       | 327      | 0.256325                 | 2.857655                | 0.732489              |
| L5   | 407       | 786      | 0.268325                 | 2.817904                | 0.756114              |
| L6   | 40        | 76       | 0.268325                 | 2.817904                | 0.756114              |
| L7   | 115       | 221      | 0.262325                 | 2.759226                | 0.723814              |
| L8   | 577       | 1,108    | 0.286325                 | 3.100326                | 0.887710              |
| L9   | 690       | 1,326    | 0.286325                 | 3.100356                | 0.887710              |
| L10  | 509       | 979      | 0.292325                 | 2.700000                | 0.789278              |
| 합계   | 5,201     | 10,000   | 2.641250                 | 31.74733                | 8.304054              |

샘플시스템 J D/L을 대상으로 각 CASE별 시스템신뢰도 지수를 평가한 결과는 표 4와 같으며 그 중 SAIFI와 ENS에 대한 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. SAIFI의 경우 사고율에 비례하는 결과를 보여주고 있으며 부하율 0.73을 반영한 ENS 결과는 이 모델의 경우 복구시간의 단축여부가 신뢰도 향상에 중요함을 알 수 있다.

표 4. 샘플시스템 J D/L의 시스템신뢰도 평가사례 결과

| 사례별    | SAIFI  | SAIDI  | CAIDI  | ASAI     | ASUI     | ENS    |
|--------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|
| CASE 1 | 0.2548 | 3.4755 | 13.639 | 0.999603 | 0.000397 | 13,196 |
| CASE 2 | 0.2548 | 1.7377 | 6.819  | 0.999802 | 0.000198 | 6,598  |
| CASE 3 | 0.2548 | 5.2133 | 20.459 | 0.999405 | 0.000595 | 19,794 |
| CASE 4 | 0.1274 | 3.4755 | 27.279 | 0.999603 | 0.000397 | 13,196 |
| CASE 5 | 0.3822 | 3.4755 | 9.0931 | 0.999603 | 0.000397 | 13,196 |

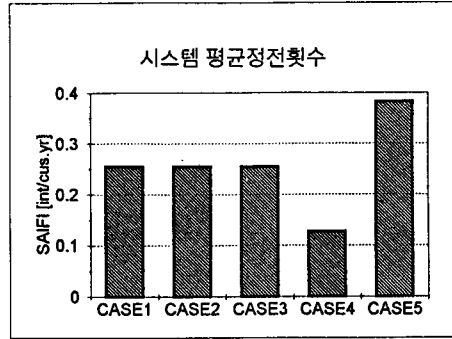


그림 5. SAIFI의 case별 공급신뢰도 평가결과

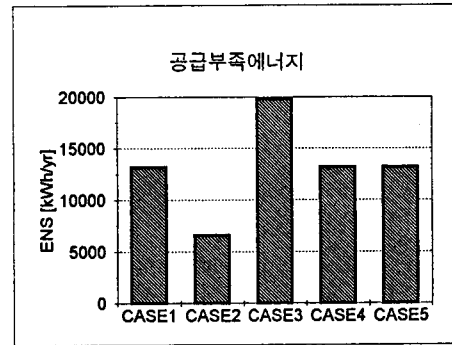


그림 6. ENS의 CASE별 공급신뢰도 평가결과

## 5. 결 론

배전계획 및 운영은 급증하는 인구과밀화와 부하증가에 효율적으로 대처하기 위하여 실제적인 공급신뢰도 평가방안이 요구된다. 본 논문은 이를 위한 기초연구로서 기존의 해석적 평가방안을 검토하고 한전의 실제통에 적용하여 검토하였다.

해석적평가법은 구성요소의 정확한 신뢰도데이터 구축문제가 평가결과의 정확성 여부를 판정하는 주요 관건이 된다. 따라서 사례연구를 통해 사고율과 복구시간의 증감이 시스템신뢰도에 미치는 영향정도를 검토하였다. 그러나 앞으로 좀더 자세한 모델해석방안과 정확한 데이터의 통계분석을 토대로 많은 실제통에 적용하여 이 분야에 이론을 정립하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] 김재철, 신중린, "22.9kV-Y 배전선로 적정운전용량 기준 선정에 관한 연구(최종보고서)", 한국전력공사배전처, 1994. 10.
- [2] 김재철, 한성호, 선개인의 2인, "배전시스템의 부하밀도와 관련된 Tie-line 계구성 및 신뢰도 지수 평가", 대한전기학회 학회논문집(B), pp.808-811, 1994. 7.
- [3] R.Bilton, R.Goel, "An analytical approach to evaluate probability distributions associated with the Reliability Indices of electric distribution systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.PWD-1, No.3, pp.245-251, July 1986.
- [4] G.Kjælle, K.Sand, "RELTRAD - An Analytical Approach for Distribution System Reliability Assessment," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.2, pp.809-814, April 1990.
- [5] "배전계획 모형개선 및 한글화 지원시스템 개발연구(최종보고서)", 한국전력공사 기술연구원, 1992. 11.
- [6] R.N.Allan, 외 4명, "A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results," IEEE TPAS, Vol.6, No.2, pp.813-820, May 1991.

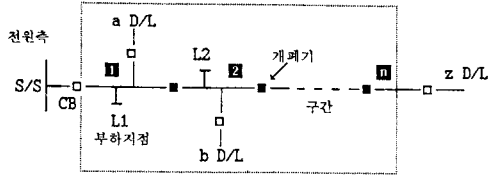


그림 2. n분할 z연계의 신뢰도 모델

$$L \lambda_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad [\text{failure/yr}] \quad (1)$$

$$L r_i = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{L \lambda_i} = \frac{U_i}{L \lambda_i} \quad [\text{hours/failure}] \quad (2)$$

$$U_i = L \lambda_i \times L r_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad [\text{hours/yr}] \quad (3)$$

여기서, 첨자 i는 부하지점의 개수(=구간수)

또한 계통의 동작 및 반응 해석을 위해 부가적으로 사용하는 시스템 신뢰도지수로는 식(4)~식(10)과 같이 시스템 평균정전횟수(SAIFI: System Average Interruption Frequency Index), 시스템 평균정전시간(SAIDI: System Average Interruption Duration Index), 수용가 평균정전시간(CAIDI: Customer Average Interruption Duration Index), 평균 공급가용율(ASAI: Average Service Availability Index), 평균 공급불가용율(ASUI: Average Unavailability Index), 공급부족에너지(ENS: Energy Not Supplied Index)을 선정하여 계산하였다.

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \times N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad [\text{int/cus.yr}] \quad (4)$$

여기서,  $N_i$ : 부하지점 i의 수용가 수

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \times N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad [\text{hrs/cus.yr}] \quad (5)$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \times N_i)}{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \times N_i)} \quad [\text{hrs/cus.int}] \quad (7)$$

$$ASAI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \times 8760 - \sum_{i=1}^n (U_i \times N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i \times 8760} \quad (8)$$

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (9)$$

$$ENS = \sum_{i=1}^n (L_a(i) \times U_i) \quad [\text{kWh/yr}] \quad (10)$$

여기서, 평균부하:  $L_a = L_p \times L_f$  ( $L_p$ : 최대부하,  $L_f$ : 부하율)

### 3. 신뢰도 모델의 구성

#### 3-1. 실계통 모델의 선정

샘플시스템은 서울지역의 K지점을 선정하여 실계통 도면을 CADPAD를 도입하여 입력하였다. 이 지역은 특고압수용가가 대부분인 상업 및 도심밀집지역으로, 지중케이블이 가공선로보다 상대적으로 많은 투우프상 구조를 갖고 있으며 방사상 운전방식을 채택하고 있다.

그림 3은 이 지역내 J D/L을 선정하여 이와 연계된 S-C D/L, P-U D/L, U-T D/L, S-N D/L, S-A D/L들을 화면상에 표현한 것이다.

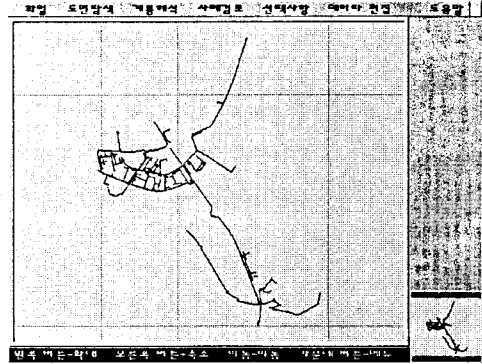


그림 3. 샘플시스템의 CADPAD화면

#### 3-2. 신뢰도 모델의 구성

선정된 실계통을 토대로 신뢰도 평가를 위한 모델계통으로 그림 4와 같이 블록화된 신뢰도 모델을 구성하였다. 여기서, 표현된 구성요소로는 변전소, 가공선로(준은선), 지중케이블(실선), 구간(N.C) 및 연계개폐기(N.O), 부하지점을 고려하였다.

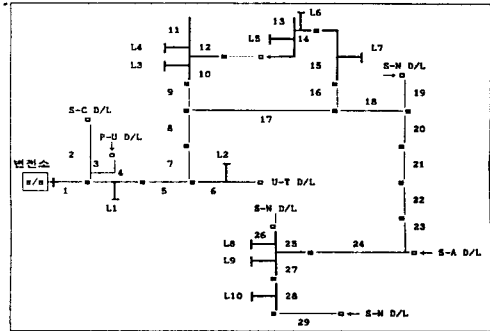


그림 4. 샘플시스템 J D/L의 신뢰도 모델도

### 4. 사례 연구

사례연구는 신뢰도 모델을 대상으로 표 1의 BASE CASE 데이터를 가지고 CASE 1을 평가하였고, 추가로 4가지 CASE에 대하여 사고율과 복구시간을 증감시키면서 이들이 시스템신뢰도 지수에 미치는 영향을 CASE별로 분석하였다.

- 1) CASE 1 : 정상치(BASE CASE)
- 2) CASE 2 : 복구시간(r)을 정상치 보다 50% 감소
- 3) CASE 3 : 복구시간(r)을 정상치 보다 50% 증가
- 4) CASE 4 : 선로사고율( $\lambda$ )을 정상치 보다 50% 감소
- 5) CASE 5 : 선로사고율( $\lambda$ )을 정상치 보다 50% 증가

표 1. 구성요소별 BASE CASE 신뢰도 데이터[1,2,6]

| 구성요소    | 사고율 [f/yr] | 복구시간 [hrs] |
|---------|------------|------------|
| 가공선로    | 0.035      | 5.0        |
| 지중케이블   | 0.030      | 30.0       |
| 개폐기(수동) | 0.006      | 2.7        |

신뢰도 해석을 위한 가정조건으로는 각 사고구간의 독립성과 연계율100%, 방사상운전을 원칙으로하였으며, 변압기사고는 무시하였다.

표 2는 CASE 1에 대한 신뢰도 데이터로서 구간별로 선로