

적정 배전계통 구성을 위한 선로분할 효과 분석

김재환* 하복남** 남기영*** 이주광*
 *한전배전처 **한전 ***전기연구소 o전기연구소

Analysis of Distribution Line Sectionalizing Effects for The Probable Distribution System Configuration

J.H.Kim* B.N.Ha** K.Y.Nam*** J.K.Lee*
 KEPCO KEPCO KERI KERI

Abstract

This paper contains the various effect of distribution feeder sectionalizing by distribution automation. The effect by automatic sectionalizing switch and the effect by manual switch are analyzed and shown according to the radial feeder and the loop feeder respectively. Based on the reliability analysis, the reference for the feeder division and sectionalization is recommended. Also, the necessary number of manual switch where the automatic switch is installed is recommended through the reliability analysis.

1. 서론

본 연구에서는 배전계통의 선로운전 자동화를 위한 적정계통 구성을 도출하기 위하여 (1) 자동화 개폐기에 의한 선로 구분효과, (2) 수동개폐기에 의한 선로 구분효과를 분석하였다. (1)에서는 선로를 수지상 선로, 루프 선로로 나누어 분석하였다. 수지상 선로는 간선만 자동개폐기로 구분한 경우, 분기선만 자동개폐기로 구분한 경우, 간선과 분기선 모두 자동개폐기로 구분한 경우에 있어서 신뢰도를 분석하였고, 루프 선로에서는 1회선 상개 루프, 2회선 상개 루프로 구성될 때의 신뢰도분석을 바탕으로 적절한 분할과 연계기준을 도출하였다. (2)에서는 사고 한건당의 평균 복구시간, 수동개폐기 조작 대수, 수동개폐기 한대당의 조작시간을 고려하여 자동화 개폐기에 의해 구분된 구간에서의 수동개폐기 취부대수를 신뢰도 분석을 통하여 도출하였다.

2. 자동화 개폐기에 의한 선로 분할효과 분석

가. 수지상 선로

(1) 간선만을 자동화 개폐기로 분할한 경우
 그림1. 과 같이 수지상 선로의 간선(Feeder)에 자동화 개폐기를 취부하고, 그 구분수(분할 수)를 n, 총 수용가 수를 C, 선로 공장은 l [km], 연간 사고발생률 f [건/km] 로하며, 선로의 각 분할구간에 있어서 수요분포 상황 및 사고발생 확률은 같다고 가정한다.

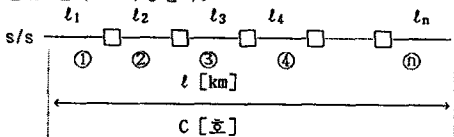


그림1. 자동화 개폐기로 간선구간만 분할한 수지상 선로

① 구간의 사고발생에 의한 정전 수용가의 합은

$$R_1 = f l_1 \times C \quad \text{[호/년]} \quad \text{---(1)}$$

② 구간의 사고에 대해서는

$$R_2 = f l_2 \times C \frac{l-l_1}{l} \quad \text{---(2)}$$

③ 구간의 사고에 대해서는

$$R_3 = f l_3 \times C \frac{l-(l_1+l_2)}{l} \quad \text{---(3)}$$

④ 구간의 사고에 대해서는

$$R_n = f l_n \times C \frac{l_n}{l} \quad \text{---(4)}$$

따라서, 연간 수용가 정전회수의 합계 R_s 는, 각 구간의 사고발생은 독립적이므로 전체로서는 총합이 된다. 즉,

$$R_s = f l_1 C + f l_2 C \frac{l-l_1}{l} + f l_3 C \frac{l-(l_1+l_2)}{l} + \dots + f l_n C \frac{l_n}{l} \quad \text{---(5)}$$

위식에서 $l_1 = l_2 = \dots = l_n = \frac{l}{n}$ 이라하면,

$$R_s = f \frac{l}{n} C \left(1 + \frac{n-1}{n} + \frac{n-2}{n} + \dots + \frac{1}{n} \right) = f \frac{l}{n} C \times \left(\frac{(1 + \frac{1}{n})n}{2} \right) = \frac{n+1}{2n} f l C \quad \text{---(6)}$$

여기서 $f l C$ 는 자동화 개폐기가 없는 경우의 신뢰도 이므로 $f l C = R_0$ 라 하면,

$$R_s = \left(\frac{n+1}{2n} \right) R_0 \quad \text{또는} \quad \frac{R_s}{R_0} = \frac{n+1}{2n} \quad \text{이된다. ---(7)}$$

(2) 분기선만의 경우

그림2. 처럼 간선에서 방사상 형태로 뻗어나온 분기선에만 자동화 개폐기를 취부한 경우, 간선을 제외한 신뢰도 R_s 는 다음과 같다.

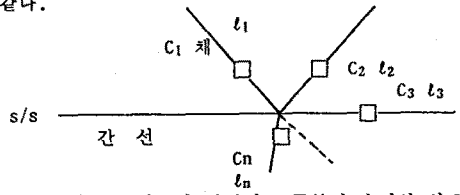


그림2. 분기선만을 자동화 개폐기로 구분한 수지상 선로

즉, $R_s = f C_1 l_1 + f C_2 l_2 + \dots + f C_n l_n \quad \text{---(8)}$

단, C_1, C_2, \dots, C_n : 분기선 1, 2, ..., n의 수용가 수

l_1, l_2, \dots, l_n : 분기선 1, 2, ..., n의 공장

만일, 분기선의 공장이 같고 ($l_1 = l_2 = \dots = l_n$), 또한 수용가가 선로에 따라서 균등하게 분포되어 있다고 하면,

$$R_B = f \left[\frac{C_B}{n} \times \frac{l_B}{n} \times n \right] = \frac{f C_B l_B}{n} \quad \text{[호/년]} \quad \text{---(9)}$$

(3) 간선과 분기선이 혼합된 경우

일반 배전선에는 간선과 분기선이 혼합되어 있으므로, 이 양자를 고려하여 생각할 필요가 있다. 그림3. 에서, 분기선의 공장이 같고, 각 간선구간의 공장도 동일하다면, 각 간선 구간 사이의 분기선 공장을 포함한 전 공장도 같게되며, 또한 수용가는 선로에 따라서 균등 분포되어 있다고 가정한다.

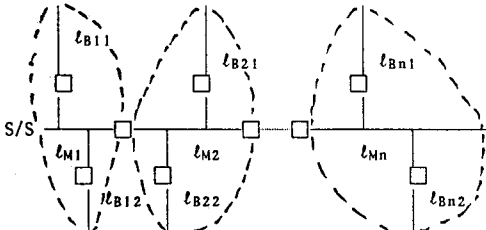


그림3. 간선과 분기선을 자동화 개폐기로 분할한 수직상 선로

이 계통의 신뢰도는 간선 부분과 분기선 부분의 신뢰도의 합으로 표현할 수 있다. 즉,

$$R = \frac{fL_M}{R_M} + \frac{fL_B}{R_B} \quad \text{---(10)}$$

여기에서,

$$R_M = fL_{M1}(C_B + C_M) + fL_{M2}(C_B + C_M) \times \left(\frac{m-1}{m}\right) + fL_{M3}(C_B + C_M) \times \left(\frac{m-2}{m}\right) + \dots + fL_{Mm}(C_B + C_M) \times \left(\frac{1}{m}\right) = fL_M C \left(\frac{m+1}{2m}\right) \quad \text{---(11)}$$

단, $l_{M1} = l_{M2} = l_{M3} = \dots = l_{Mn} = \frac{L_M}{m}$

C_B : 분기선의 수용가 호수 합계

C_M : 간선의 수용가 호수 합계

$C = C_B + C_M =$ 총 수용가 합계

m : 간선의 구간수

또, 각 간선구간내의 분기선 수를 n' 이라 하면,

$$R_B = \frac{f C_B L_B}{m n'} \quad \text{---(12)}$$

$$R = \frac{fL_M C}{R_M} + \frac{fL_B C_B}{R_B} \quad \text{---(13)}$$

$$= \frac{fL_M C (m+1)}{2m} + \frac{fL_B C_B}{m n'} \quad \text{---(14)}$$

$$= f \left[\frac{L_M C (m+1)}{2m} + \frac{L_B C_B}{m n'} \right] \quad \text{---(15)}$$

여기서, $\frac{L_M}{L_M + L_B} = 1 - U \quad \text{---(16)}$

$$\frac{L_B}{L_M + L_B} = U \approx \frac{C_B}{C} \quad (\text{균등분포이므로})$$

$L_M + L_B = L$ 로 두면,

$$R = R_M + R_B = f \left[\frac{L_M C (m+1)}{2m} + \frac{C_B L_B}{m n'} \right] \quad \text{---(17)}$$

$$= f \left[\frac{(1-U)(m+1)LC}{2m} + \frac{U^2 CL}{m n'} \right] \quad \text{---(18)}$$

fCL 은 이 배전계통에 자동화 개폐기가 없는 경우의 신뢰도 이므로 이것을 R_0 라고 하면,

$$R = R_0 \left\{ \frac{(1-U)(m+1)}{2m} + \frac{U^2}{m n'} \right\} \quad \text{---(19)}$$

$$\frac{R}{R_0} = \frac{n'(1-U)(m+1) + U^2}{2mn'} \quad \text{이 된다. ---(20)}$$

나. LOOP상 선로

(1) 1회선 상개 (nomal open) LOOP의 경우

그림4. 에서 보이는 바와같이 변전소로부터 Feeder달단의 양단에 취부되어 있는 자동화 개폐기(1, n+1)에 이르는 사이구간의 연간 정전횟수는 0이다. 즉, 케이블, 고압철연전선의 사용 등에 의한 설비강화에 의해서 연간 무사고로 보면, 각 구간의 수용가의 연간정전 횟수는 각각,

$$f l_1 C \frac{l_1}{l}, \quad f l_2 C \frac{l_2}{l}, \quad \dots, \quad f l_n C \frac{l_n}{l} \quad \text{---(21)}$$

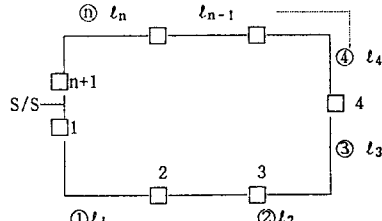


그림4. 1회선 상개 LOOP선로

$\therefore l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_n = \frac{l}{n}$ 의 경우

$$R_s = \frac{f l C}{n} \left[\frac{1}{n} + \frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n} \right] = \frac{f l C}{n} = \frac{R_0}{n} \quad \text{---(22)}$$

(2) 2회선 상개 LOOP의 경우

1회선이 사고인 경우에 다른 1회선으로부터의 역송량의 제약이 없다면 1회선 상개 LOOP의 경우와 같지만, 역송용량에 제약이 있는 경우는 다음과 같이 된다. 즉, 그림5.에 있어서 1회선당의 구간수 n , 2회선간의 결합 개폐기로부터의 역송가능 구간수 n_r , 각 구간의 공장은 같다고 보면 전과 같이 유도할수 있다.

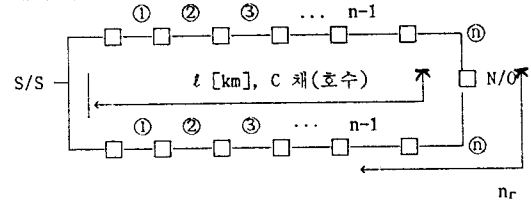


그림5. 2회선 상개 LOOP선로

① 구간 사고의 경우 신뢰도는 $f \frac{l}{n} \times C \frac{n-n_r}{n}$ [호/년]

② " " $f \frac{l}{n} \times C \frac{n-(n_r+1)}{n}$

③ " " $f \frac{l}{n} \times C \frac{n-(n_r+2)}{n}$

($n-n_r$) 구간사고의 경우의 신뢰도는 $f \frac{l}{n} \times C \frac{1}{n}$

($n-n_r+1$)구간~ n 구간 사고의 경우의 신뢰도는 $f \frac{l}{n} \times C \frac{1}{n}$

따라서 1회선의 전공장에 대한 신뢰도는 ($R_0 = fCL$ 일때)

$$R_s = R_0 \left[\frac{(n-n_r)^2 + n + n_r}{2n^2} \right] \quad \text{---(23)}$$

3. 수동개폐기에 의한 선로 구분효과 분석

수동개폐기에 의한 신뢰도 향상 효과는, 구분효과에 의한 정전 수용가수의 감소 효과와 사고개소 탐색시간의 단축효과가 있으나, 여기서는 사고시의 구분효과에 대해서 분석한다. 수동개폐기의 구분효과 계산은 자동개폐기의 경우와 대체로 같지만, 수동개폐기의 경우에는 조작시간이 꽤 크기 때문에 개폐기 대수의 증가에 따라서 효과가 감소하는 경향이 있으므로 이에 대해서만 계산한다.

가. LOOP상 선로

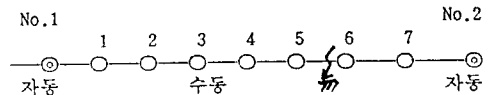


그림6. 수동개폐기의 선로구분 효과-LOOP상 선로

위 그림에서처럼 자동개폐기 사이를 수동개폐기로 구분한 경우, 사고 구간의 자동개폐기 No 1, 2를 Open 하고 현장에 출동하여 최초로 정중앙의 4번 수동개폐기를 개방한후, 접지저항 측정이나 강행 송전을 실시하여 사고개소가 좌·우 방향인지를 판정한다. 만약 우측이라면, 똑같은 방법을 적용하여 사고구간을 탐색한다.이 경우,

① 자동화 개폐기와 개방된 수동개폐기 사이의 수용가의 정전시간은 자동화 개폐기가 Open 되었다가 Close 될때까지의 시간이 된다. (자동 No. 1~수동 4)

② 수동개폐기 4~6 사이는, 자동화 개폐기에 의해서 원제

구분된 후 수동 개폐기4가 투입될때 까지의 시간,
 ③ 수동개폐기 7~ 자동화개폐기 2 사이의 구간은 자동구
 분된 후 2번 자동화개폐기가 투입될때 까지의 시간,
 ④ 수동개폐기 6~7 사이의 구간은 자동구분된 후 수동개
 폐기 6, 7 이 투입될때까지의 시간이 각 구간 수용가의 정전
 시간이 된다. 그러므로 신뢰도 산정의 기본이 되는 평균정
 전 시간(dim)은

$$\text{dim} = \frac{1}{8} \text{di} + \left[\frac{1}{2} \text{ts} + \frac{2}{2^2} \text{ts} + \frac{3}{2^3} \text{ts} \right] = \frac{1}{8} \text{di} + \frac{11}{8} \text{ts} \quad (24)$$

단, dim = 사고 1회당의 평균정전시간 [분/회]
 di = 사고 1건당의 평균복구시간 [분/회]
 ts = 수동개폐기 1대당의 평균조작시간 [분/회]
 (개방 → 접지저항 측정 → 송전까지의 시간)
 수동개폐기의 조작 대수를 n대라고 할때, 식(25)의 일반식
 은 식(26)과 같이 된다.

$$\text{dim} = \frac{1}{2^n} \text{di} + \left[\frac{1}{2^1} + \frac{2}{2^2} + \frac{3}{2^3} + \dots + \frac{n}{2^n} \right] \text{ts} \quad (25)$$

나. 수지상 선로

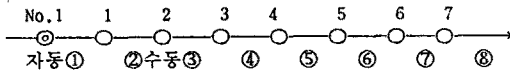


그림7. 수동개폐기의 선로구분 효과-수지상 선로
 그림7.에서와 같이 수지상 선로의 간선에 있어서, 자동화
 개폐기의 사이구간에 수동개폐기를 설치하여 정전구간의 단
 축을 꺾는다.

(1) 제 ① 구간 사고의 경우 평균정전시간 R₁은,
 $R_1 = (\text{정전 수용가수}) \times (\text{정전시간}) / \text{총 수용가수}$

$$= \left(\frac{1}{2^n} \times 2^n \times \text{di} \times \frac{1}{2^n} \right) \times \frac{1}{2^n}$$

$$= \frac{2^n}{2^n} \text{di} \times \frac{1}{2^n}$$

(2) 제 ② 구간 사고의 경우 평균정전시간 R₂는,
 $R_2 = \left[\frac{2^n - 1}{2^n} \text{di} + \frac{1}{2^n} n \text{ts} \right] \times \frac{1}{2^n}$

(3) 제 ③ 구간 사고의 경우

$$R_3 = \left[\frac{2^n - 2}{2^n} \text{di} + \frac{2}{2^n} (n-1) \text{ts} \right] \times \frac{1}{2^n}$$

따라서, 전체적인 평균정전시간은 각 구간사고의 발생을 독
 립현상으로 간주하면, 각 구간 정전사고에 대한 평균 정전
 시간의 합이 된다. 위 식들을 일반화시키기 위하여 di 항
 과 ts 항으로 분류하여 일반식을 구한다.

di 항은 일반화하면 다음과 같다.

$$\text{di} = \frac{1}{2^n} (2^n + 2^{n-1} + 2^{n-2} + \dots + 1)$$

$$= \frac{1}{2^n} \left[1 + \frac{2^n - 1}{2^n} + \frac{2^n - 2}{2^n} + \dots + \frac{1}{2^n} \right]$$

$$= \frac{1}{2^n} \left[\frac{1}{2^n} \right] \left[\frac{2^n (1 + 2^n)}{2} \right] = \frac{1 + 2^n}{2 \times 2^n} \quad (26)$$

ts 항을 일반화시키면 다음과 같다.

$$\text{ts} = \left[2^n - \frac{n}{2} - 1 \right] \times \frac{1}{2^n} \quad (27)$$

그러므로 $R_s = \frac{2^n + 1}{2 \times 2^n} \text{di} + \frac{2^n - \frac{n}{2} - 1}{2^n} \text{ts} \quad (28)$

4. 결론

가. 자동화 개폐기에 의한 선로 분할 효과

(1) 수지상 선로

① 간선만 자동화 개폐기로 구분한 경우는 그림8. 의 Graph
 에서 알수 있듯이 구분수가 3~4 정도일때 그 구분효과가
 크고, 만약 n을 무한대로 한경우에도 그 값은 0.5에 수렴한
 다.

② 분지선만 자동화 개폐기로 구분한 경우는 Feeder의 수가
 증가한것과 동일한 효과로 되며, 분지선이 4~5 정도가
 될때 구분효과가 크다.

③ 간선과 분지선을 혼합한 경우는 다음과 같은 경향이 있
 다. 즉, 간선구간수 m을 4~5 이상으로 하여도 신뢰도 향
 상에는 그다지 기여하지 못하므로, 분지선의 증가가 간선
 공장과 동일 정도 (U ≃ 0.5) 에서는 자동화 개폐기를 많이
 설치하여도 효과가 좋지않고, 간선구간 구분수가 많을 수
 록 이런 경향이 있다.

(2) LOOP 선로

그림9. 에서 알수 있듯이 신뢰도는 수지상선로 (간선만의
 경우)에 비하여 현저히 향상됨을 알수있다. 그러나 2 회
 선상개 LOOP에 있어서는 역송용량에 제한이 있으므로 신뢰
 도는 저하한다.

나. 수동개폐기에 의한 선로 분할 효과

(1) LOOP의 경우

그림 10.에서 알수 있듯이 사고 1 건당의 평균 정전시간은
 수동개폐기 조작 대수가 2대정도 까지 급격히 감소한다. 그
 러나 4대 이상 부터는 어느 정도 증가 시켜도 감소하지 않고
 개폐기 조작 시간의 2배에 수렴한다. 따라서 사고복구 시
 간에 대한 개폐기 조작시간의 비율이 크면, 구분효과는 저하
 함을 알수있다.

(2) 수지상 선로

그림 11.에서 알수있듯이 사고 1건당의 평균 정전시간은
 수동개폐기 조작 대수가 1대에서 2대 정도까지는 크게 감소
 하지만 그 이상 설치하면 감소율이 적어진다. 또 수동개폐기
 대수를 어느정도 증가 시켜도 정전시간은 감소하지 않고, 복
 구시간의 1/2에 개폐기 조작시간을 더한 값으로 수렴한다.
 따라서 사고복구시간에 대한 개폐기 조작시간의 비율이 크
 면, 구분효과는 저하하며 동시에 2내지 3대에서 가장 감소
 하고, 그 이상에서는 증가하고 수렴하는 경향이 있다.

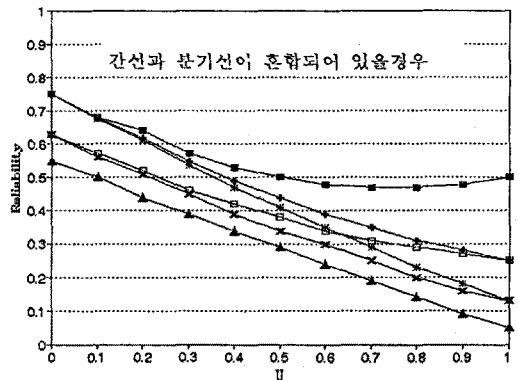
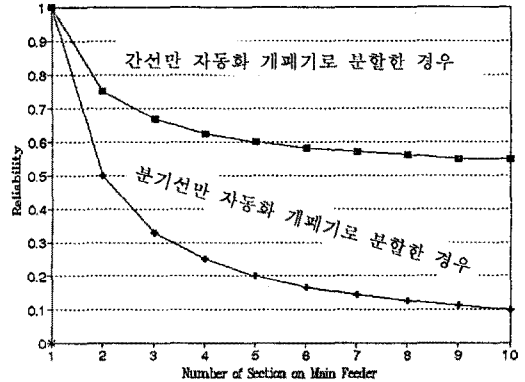


그림 8. 자동화 개폐기에 의한 선로분할 구간수와 신뢰도
 의 관계(수지상 선로)

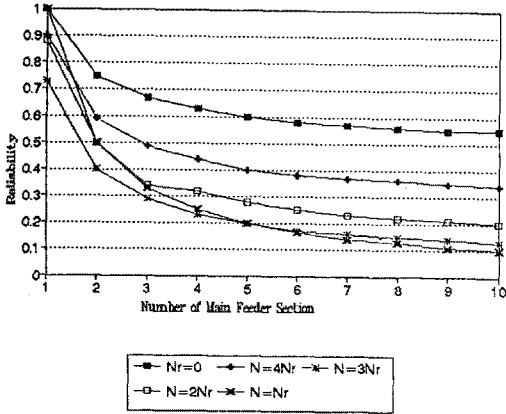


그림 9. 자동화 개폐기에 의한 선로분할 구간수와 신뢰도의 관계(loop상 선로)

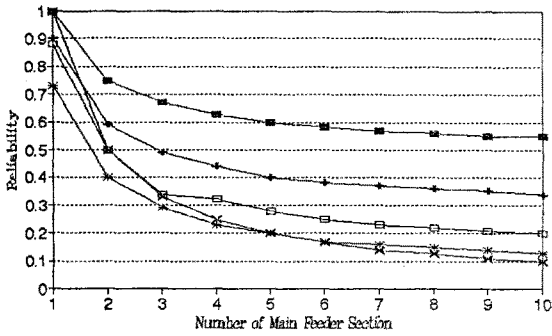


그림 10. 수동개폐기의 선로분할 효과(loop상 선로)

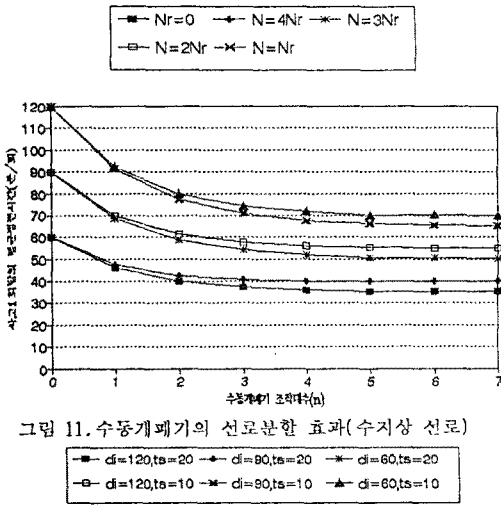


그림 11. 수동개폐기의 선로분할 효과(수지상 선로)

5. 참고 문헌

- [1]일본, 복해도전력, 배전부, 배전설비 계획기준, 1988, 3
- [2]일본, 구주전력, 배전부, 배전설비계획업무 가이드, 1980