

영상회로를 이용한 병행 송전선로에서의 고장점 추정 알고리즘

박흥규\*, 이재규\*\*, 유석구\*  
\*한양대학교 \*\*대덕대학

Fault Location Algorithm in Parallel Transmission Line Using Zero Sequence Network

Hong-Kyu Park\*, Jae-Gyu Lee\*\*, Seok-Ku You\*  
\*Hanyang Univ. \*\*Dae Duk Col.

**Abstract** - This paper presents an accurate algorithm for fault location of a single phase to earth fault on a two-parallel transmission line using only one-terminal data. It is impossible to calculate the accurate fault distance, because of the unknown fault resistance and fault current at the fault point. The faulted line circuit and the zero-sequence circuit of two-parallel line are used as a fault location model, which the source impedance of the remote end is not involved. The algorithm can eliminate the effect of load flow and the fault resistance in calculating the fault location.

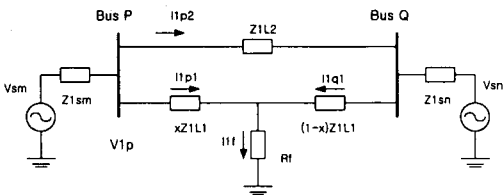
1. 서론

계통을 운용함에 있어 중요한 목적중의 하나는 정전없이 수용가에게 전력을 공급하는 것이다[1]. 그러나, 계통에서의 고장은 여러 가지 원인으로 인하여 피할 수 없는 상황이며, 전력 공급의 신뢰성 향상을 위해 고장 발생시 좀 더 신속한 대책이 필요한 실정이다. 송전선로에서 고저항 지락고장이 발생하였을 경우, 고장점에서의 고장저항과 이에 흐르는 고장전류는 미지수이기 때문에 고장거리를 정확하게 계산할 수 없다[2].

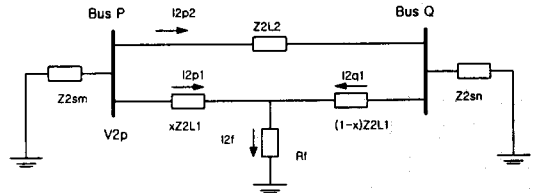
본 논문에서 제안한 고장점 추정 알고리즘은 병행 2회선 송전선로의 1선 지락 고장시, 한 단자의 데이터만을 이용하는 단단자 방법으로, 고장전류를 유도하기 위해 부하의 변화에 관계없는 영상분 회로를 사용하였으며, 상대단의 정보나 고장저항에 대한 정보 없이도 정확한 고장거리를 계산할 수 있었다.

2. 거리 계산 오차

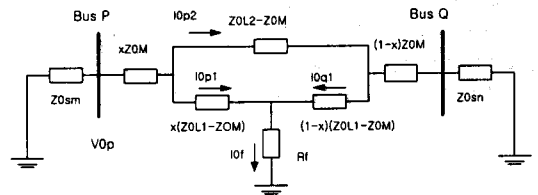
그림 1은 병행 2회선 송전선로에서 모선 P로부터 거리 x만큼 떨어진 지점에서의 1선 지락 고장시, 사고 계통에 대한 각각의 대칭성분 회로를 나타낸다[3,4].



(a) 정상분 회로



(b) 역상분 회로



(c) 영상분 회로  
그림 1 계통의 대칭분 회로

모선 P에서 사고 선로의 계전기 설치점에서의 전압은  $V_{Ry} = V_{1p} + V_{2p} + V_{0p}$ 로 나타낼 수 있고, 각각의 정상, 역상, 영상분 전압은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{1p} &= xZ_{1L1}I_{1p1} + R_f I_{1f} \\ V_{2p} &= xZ_{2L1}I_{2p1} + R_f I_{2f} \\ V_{0p} &= xZ_{0M} \cdot (I_{0p1} + I_{0p2}) + x(Z_{0L1} - Z_{0M}) \cdot I_{0p1} + R_f I_{0f} \end{aligned} \quad (1)$$

3상 전력계통내의 송전선로에 대해 정상 임피던스와 역상 임피던스는 같고, 건전회선과 고장회선의 선로 특성이 같다고 가정하면, 선로 임피던스 관계를 식 (2)와 같이 놓을 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{0L1} &= Z_{0L2} = Z_{0L} \\ Z_{1L1} &= Z_{2L1} = Z_{1L2} = Z_{2L2} = Z_{1L} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 계전기 설치점에서의 측정 전압을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{Ry} &= V_{1p} + V_{2p} + V_{0p} \\ &= xZ_{1L}[I_{Ry} + K_r \times 3I_{0p1} + K_m \times 3I_{0p2}] + R_f I_f \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $I_{Ry} = I_{1p1} + I_{2p1} + I_{0p1}$   
 $I_f = I_{1f} + I_{2f} + I_{0f}$

$$\begin{aligned} I_{op1} &= (I_{a1} + I_{b1} + I_{c1})/3 \\ I_{op2} &= (I_{a2} + I_{b2} + I_{c2})/3 \\ K_r &= (Z_{0L} - Z_{1L})/3Z_{1L} \\ K_m &= Z_{0m}/3Z_{1L} \end{aligned}$$

식 (3)으로부터 고장거리  $x$ 를 구하기 위해  $x$ 에 관해 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있는데, 고장저항과 고장전류는 미지수이기 때문에 고장거리를 계산함에 있어 오차를 유발시킨다.

$$x = \frac{(V_{Ry} - R_f \times I_f)}{Z_{1L}[I_{Ry} + K_r \times 3I_{op1} + K_m \times 3I_{op2}]} \quad (4)$$

따라서, 정확한 고장거리를 계산하기 위해서는 고장점에서의 고장저항 값과 이에 흐르는 고장전류 값을 알아내는 것이 무엇보다도 중요하다.

### 3. 고장거리 추정 알고리즘

일반적으로, 고장 발생시 계통의 영상분 회로에는 부하가 포함되지 않기 때문에, 고장전류를 유추하기 위한 고장점 추정 모델로 사용함으로써 부하의 영향을 무시할 수 있다. 그림 1의 사고 계통 영상분 회로에서 영상분 고장전류는 식 (5)와 같고, 페루프에 대해 KVL(Kirchhoff's Voltage Law)을 적용하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$I_{of} = I_{op1} + I_{oq1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{op2} \cdot (Z_{0L2} - Z_{0M}) + I_{oq1} \cdot (1-x)(Z_{0L1} - Z_{0M}) \\ - I_{op1} \cdot x(Z_{0L1} - Z_{0M}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서, 모선 Q로부터 고장점으로 흐르는 영상분 고장전류  $I_{oq1}$ 항을 제거할 수 있으며, 병행 송전 선로에서 고장회선과 전진회선의 선로 영상분 임피던스를 같다고 놓았기 때문에, 고장점에서의 고장전류에 대한 영상분 전류를 식 (7)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$I_{of} = \frac{I_{op1}(Z_{0L1} - Z_{0M}) - I_{op2}(Z_{0L2} - Z_{0M})}{(1-x)(Z_{0L1} - Z_{0M})} = \frac{I_{op1} - I_{op2}}{(1-x)} \quad (7)$$

그런데, 1선 지락사고에 대한 고장전류의 대칭성분 관계는  $I_{1f} = I_{2f} = I_{0f} = I_f/3$ 이므로, 이를 모선 P의 계전기 설치점에서 측정된 전압식에 대입하면, 식 (3)은 식 (8)과 같이 고장전류 항이 제거된 식으로 구할 수 있다.

$$V_{Ry} = xZ_{1L}[I_{Ry} + K_r \times 3I_{op1} + K_m \times 3I_{op2}] + \frac{3R_f(I_{op1} - I_{op2})}{(1-x)} \quad (8)$$

식 (8)을 고장거리  $x$ 에 대해 정리하면 식 (9)와 같다.

$$x^2 + K_1 \times x + K_2 + K_3 \times R_f = 0 \quad (9)$$

$$\text{여기서, } K_1 = -\left[1 + \frac{V_{Ry}}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{op1} + Z_{0M} \cdot I_{op2}}\right]$$

$$K_2 = \left[\frac{V_{Ry}}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{op1} + Z_{0M} \cdot I_{op2}}\right]$$

$$K_3 = -\left[\frac{3 \cdot (I_{op1} - I_{op2})}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{op1} + Z_{0M} \cdot I_{op2}}\right]$$

이를 각각 실수부와 허수부로 분리하면 식 (10)과 식 (11)

이 되고, 식 (10)을  $R_f$ 에 대해 정리한 후 식 (10)에 대입하면 식 (12)와 같이 고장거리  $x$ 에 대한 2차 방정식을 얻을 수 있다.

$$x^2 + \text{Re}(K_1) \times x + \text{Re}(K_2) + \text{Re}(K_3) \times R_f = 0 \quad (10)$$

$$\text{Im}(K_1) \times x + \text{Im}(K_2) + \text{Im}(K_3) \times R_f = 0 \quad (11)$$

결국, 이를 근 해법으로 풀면 고장거리  $x$ 에 대한 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x^2 + x \times \left[ \text{Re}(K_1) - \frac{\text{Re}(K_3) \times \text{Im}(K_1)}{\text{Im}(K_3)} \right] \\ + \left[ \text{Re}(K_2) - \frac{\text{Re}(K_3) \times \text{Im}(K_2)}{\text{Im}(K_3)} \right] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(단,  $0 \leq x \leq 1$ )

여기서, 계산된 고장거리  $x$ 는 선로의 전체 길이를 1로 두어 계산하였기 때문에, 0과 1사이의 값을 택한 후, 양 단자사이의 거리를 곱하면 실제 고장거리를 구할 수 있다.

### 4. 사례 연구

본 논문에서 제시한 고장거리 계산 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 154(kV)급 양단 전원 병행 2회선 송전선로에 대해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 고장 데이터를 생성하였다. 선로 길이가 25(km)인 송전선에서 양단전원의 전압 위상각 차이를  $10^\circ$ 로 두어 조류가 모선 P로부터 유출되도록 하였다. 고장점 위치를 1.25, 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 18.75, 20, 21.25(km)로 변화시키면서, 또한 각각의 고장점 위치에서 고장저항을 5, 10, 15, 20, 25, 30( $\Omega$ )으로 변화시키면서 모의하였다. 그리고, 상대단 전원의 변화에 대한 영향을 검토하기 위하여 상대단 전원의 임피던스를 2배, 3배, 5배로 변화시키면서 모의하였다.

#### 4.1 고장점의 위치 변화

표 1은 고장저항이 25( $\Omega$ )일때, 고장점 위치를 변화시킨 경우의 고장거리 계산 결과를 나타낸다.

표 1 고장저항이 25( $\Omega$ )일 때 고장점 위치 변화에 따른 고장거리 계산 결과

거리(km)	계산치(km)	오차(%)
1.25	1.260	0.80
2.5	2.478	0.87
7.5	7.418	1.10
12.5	12.325	1.35
17.5	17.245	1.45
18.75	18.315	1.80
20.0	19.633	1.85
21.25	20.735	2.42

#### 4.2 고장저항의 변화

표 2는 계전기 설치점으로부터 20(km)지점에서 고장저항을 5, 10, 15, 20, 25, 30( $\Omega$ )으로 변화시키면서

모의한 경우의 고장거리 계산 결과이다.

표 2 고장점 위치 20(km)에서의 고장저항 변화에 따른 고장거리 계산

저항	계산치(km)	오차(%)
5( $\Omega$ )	19.750	1.25
10( $\Omega$ )	19.780	1.11
15( $\Omega$ )	19.738	1.30
20( $\Omega$ )	19.733	1.34
25( $\Omega$ )	19.770	1.14
30( $\Omega$ )	19.805	0.98

표 2에서 나타난 것처럼, 제안된 알고리즘에서는 미지수인 고장저항에 대한 항이 계산 과정 중에 제거되므로, 고장거리를 계산함에 있어 고장저항의 변화에 무관함을 알 수 있다. 그림 2는 고장저항이 20( $\Omega$ )일 때 고장거리 계산 결과의 수렴 곡선을 나타낸다.

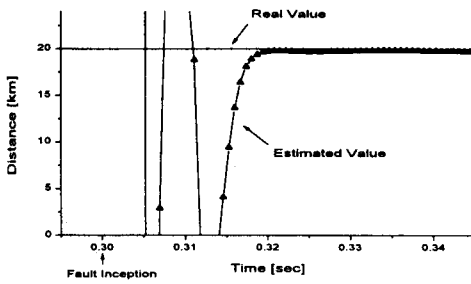


그림 2 고장저항이 20( $\Omega$ )일 때 고장거리 계산 수렴 곡선

### 4.3 상대단 전원 임피던스의 변화

표 3은 고장저항을 25( $\Omega$ )으로 고정시킨 후, 상대단 전원의 임피던스와 고장점 위치를 변화하면서 모의한 경우의 고장거리 계산 결과이다.

표 3 고장거리와 전원 임피던스 변화에 따른 고장거리 계산 결과

거리(km)	상대단 전원 임피던스 변화					
	2배		3배		5배	
계산치(km)	오차(%)	계산치(km)	오차(%)	계산치(km)	오차(%)	
1.25	1.245	0.46	1.243	0.58	1.243	0.58
2.5	2.483	0.66	2.485	0.60	2.490	0.61
7.5	7.435	0.87	7.443	0.77	7.455	0.60
12.5	12.365	1.08	12.345	1.24	12.370	1.04
17.5	17.245	1.45	17.278	1.27	17.275	1.29
20.0	19.688	1.56	19.755	1.23	19.723	1.38

표 3의 결과와 같이, 제안된 알고리즘에서는 전원 임피던스의 항이 포함되어 있지 않기 때문에, 상대단의 전원 임피던스의 변화에 대해 무관함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

송전선로에서 고저항 지락고장이 발생하였을 경우, 고장점에서의 고장저항과 이에 흐르는 고장전류는 측정할 수 없으므로 정확한 고장거리를 계산할 수 없다.

본 논문에서 제안한 고장거리 추정 알고리즘은 병행 2회선 송전선로에서 1선 지락 고장이 발생하였을 경우, 정확한 고장거리를 계산하기 위해 한 단자의 데이터만을 사용하는 단단지 방법으로 지락 고장에 대한 고장점 추정 모델로써 부하 변화에 관계없는 영상분 회로를 사용하였으며, 상대단의 정보나 고장저항에 대한 정보 없이도 정확한 고장거리를 계산할 수 있었다. 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 고장점의 위치 변화, 고장저항의 변화, 상대단 전원의 임피던스 변화등 다양한 계통 조건하에서의 시뮬레이션을 실행한 결과, 고장거리 오차가 2-3% 정도의 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Lin Bo Sheng and S. Elangovan, "A Fault Location Method for Parallel Transmission Lines" Electrical Machines and Power Systems, p253-259, 1999.
- [2] Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke, "Power System Relaying" 2th edition, Research Studies Press LTD, 1995.
- [3] Y. Liao, S. Elangovan, "Digital Distance Relaying Algorithms for First-Zone Protection for Parallel Transmission Lines", IEE Proceeding - Generator, Transmission, Distribution, Vol 145, No 5, p531-536, Sep 1999.
- [4] O. Zhang, Y. Zhang, W. Song and Y. Yu, "Transmission Line Fault Location for Phase to Earth Fault Using One Terminal Data", IEE Proceeding - Generator, Transmission, Distribution, Vol 146, No 2, p121-124, March 1999.

### [부 록]

#### A. 기호에 대한 명명

- $V_{ap}, V_{bp}, V_{cp}$  : 모선 P의 계전기 설치점에서의 상전압
- $V_{1p}, V_{2p}, V_{0p}$  : 전압  $V_{ap}$ 의 정상, 역상, 영상분 전압
- $I_{ap1}, I_{bp1}, I_{cp1}$  : 모선 P에서 고장회선으로 흐르는 상전류
- $I_{ap2}, I_{bp2}, I_{cp2}$  : 모선 P에서 건전회선으로 흐르는 상전류
- $I_{1p1}, I_{2p1}, I_{0p1}$  : 모선 P에서 고장회선으로 흐르는 상전류의 정상, 역상, 영상분 전류
- $I_{1p2}, I_{2p2}, I_{0p2}$  : 모선 P에서 건전회선으로 흐르는 상전류의 정상, 역상, 영상분 전류
- $I_{1q1}, I_{2q1}, I_{0q1}$  : 모선 Q에서 고장회선으로 흐르는 상전류의 정상, 역상, 영상분 전류
- $I_f$  : 고장점에서의 고장전류
- $I_{1f}, I_{2f}, I_{0f}$  : 고장전류의 정상, 역상, 영상분 전류
- $R_f$  : 고장점에서의 고장저항
- $Z_{1L1}, Z_{2L1}, Z_{0L1}$  : 고장회선 선로의 정상, 역상, 영상 임피던스
- $Z_{1L2}, Z_{2L2}, Z_{0L2}$  : 건전회선 선로의 정상, 역상, 영상 임피던스
- $Z_{0M}$  : 선로의 상호 임피던스
- $Z_{1sm}, Z_{2sm}, Z_{0sm}$  : 발전기 m의 정상, 역상, 영상 임피던스
- $Z_{1sn}, Z_{2sn}, Z_{0sn}$  : 발전기 n의 정상, 역상, 영상 임피던스
- $K_r$  : Residual compensation factor
- $K_m$  : Mutual compensation factor