

송전선로에서의 고저항 지락고장시 고장거리 추정에 관한 알고리즘

박홍규^{U*}, 이명수^{*}, 이재규^{**}, 유석구^{*}
^{*}한양대학교 ^{**}대덕대학

A Fault Location Algorithm for Transmission Lines in the High-Resistance Fault

Hong-Kyu Park^{U*}, Myoung-Soo Lee^{*}, Jae-Gyu Lee^{**}, Seok-Ku You^{*}
^{*}Hanyang Univ. ^{**}Tae Dok Col.

Abstract - This paper presents an algorithm for the computation of fault location for a transmission line by means of the voltage and current signals. It is impossible to calculate the accurate fault distance, because of the fault resistance and fault current which are unknown. All Currents in the lines are divided by the current distribution factor, so the fault current through the fault resistance can be represented by using data from one terminal of transmission line. This algorithm proposed can calculate the fault distance with only the faulty phase information.

점에서 본 고장상의 전압은 식 (1)과 같고, 그림 2의 병행 2회선 송전선로에서의 전압은 식 (3)과 같다.

$$V_{Ry} = xZ_{IL} \times [I_{Ry} + K_r \times 3I_0] + R_f \times I_f \tag{1}$$

$$x = \frac{(V_{Ry} - R_f \times I_f)}{Z_{IL} \times [I_{Ry} + K_r \times 3I_0]} \tag{2}$$

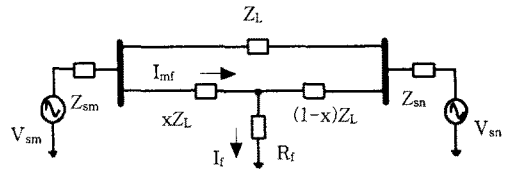


그림 2. 양단전원 병행 2회선 송전선로

$$V_{Ry} = xZ_{IL} [I_{Ry} + K_r \times 3I_0 + K_m \times 3I_{0M}] + R_f \times I_f \tag{3}$$

$$x = \frac{(V_{Ry} - R_f \times I_f)}{Z_{IL} [I_{Ry} + K_r \times 3I_0 + K_m \times 3I_{0M}]} \tag{4}$$

- 여기서, V_{Ry} : 계전기가 계속한 전압 (kV/phase)
- I_{Ry} : 계전기가 계속한 전류 (kA/phase)
- I_0 : 고장회선의 영상전류 (kA/phase)
- I_{0M} : 건전회선의 영상전류 (kA/phase)
- I_f : 고장전류 (kA/phase)
- Z_{0L}, Z_{1L} : 선로의 영상, 정상 임피던스 (Ω)
- Z_{0M} : 선로의 영상 상호 임피던스 (Ω)
- R_f : 고장저항 (Ω)

- x : 계전기 설치점에서 고장점까지의 거리 (pu)
- $K_r = (Z_{0L} - Z_{1L}) / 3Z_{1L}$: residual compensation factor
- $K_m = Z_{0M} / 3Z_{1L}$: mutual compensation factor

식 (1)과 식 (3)으로부터 고장거리를 추정함에 있어 식 (2)와 식 (4)에서 나타난 것처럼, 미지수인 고장저항과 고장전류로 인해 정확한 고장거리 추정이 어렵다. 병행 2회선인 경우, 보다 정확한 고장거리를 추정하기 위해서 고장회선의 영상전류뿐만 아니라 건전회선의 영상전류도 보상해야 하지만, 건전회선의 영상전류는 항상 측정 가능하지 않기 때문에 오차를 유발시킨다. 고장 후, 계전기 설치점에서 측정되는 전류는 식 (5)와 같이 부하전류 (I_{Load})와 순수 고장전류 (I_{mf})의 합으로 표시된다.

$$I_{Ry} = I_{Load} + I_{mf} \tag{5}$$

2. 고저항 지락고장

그림 1의 양단전원 1회선 송전선로에서, 계전기 설치

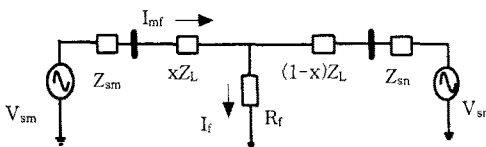


그림 1. 양단전원 1회선 송전선로

3. 고장거리 추정에 관한 알고리즘

송전선로에서의 고장전류 관계식을 유도한 결과, 고장 전류는 전류분포계수에 의해 분배된다(3). 전류분포계수

는 선로의 임피던스와 미리 계산된 전원 임피던스 정보를 이용한 고장점까지의 거리로 표현되기 때문에, 거리 추정에 필요한 전류를 거리에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 고장저항은 고장거리 계산 과정에서 고장점까지의 거리로 표현되기 때문에, 결국, 고장거리 계산에 필요한 미지수 R_f , I_f , I_{OM} 을 모두 고장거리에 관한 함수로 나타낼 수 있다. 정확한 고장거리 추정을 위해 보상하는 건전회선 및 고장회선의 영상전류를 고장상만의 정보로 나타냄으로써, 건전회선이나 고장회선의 건전상에 대한 정보를 얻지 못할 경우에도 정확한 고장거리를 추정할 수 있다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 계전기 설치점에서 측정된 고장 전과 고장 후의 전류와 전압 데이터를 이용하여, 고장 전의 데이터는 고장이 인가된 시점으로부터 2cycle 전의 데이터를 사용한다.

3.1 양단 1회선

a상에서 1선 고저항 지락고장시, 영상전류와 고장전류를 전류분포계수를 이용하여 고장상에 대한 정보만으로 나타내면 식 (6)과 식 (7)과 같고, 이를 식(1)에 대입하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$I_f = \frac{3 \times (I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{1p} + D_{0p}} \quad (6)$$

$$I_0 = \frac{D_{0p} \times (I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{1p} + D_{0p}} \quad (7)$$

$$V_{ARy} = xZ_{IL} \left[I_{ARy} + K_r \frac{3D_{0p}(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{1p} + D_{0p}} \right] + R_f \frac{3(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{1p} + D_{0p}} \quad (8)$$

여기서, $D_{1p} = \frac{(1-x)Z_{1L} + Z_{1sn}}{Z_{1sn} + Z_{1L} + Z_{1sn}}$: 정상전류 분포계수

$D_{0p} = \frac{(1-x)Z_{0L} + Z_{0sn}}{Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0sn}}$: 영상전류 분포계수

식 (8)을 고장거리 x 에 대해 정리하면 식 (9)가 되고, 이를 실수부와 허수부로 분리하면 식 (10)과 식 (11)이 된다.

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

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

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

식 (11)에서 R_f 에 대해 정리한 식 (12)를 식 (10)에 대입하면 식 (13)과 같고, 이를 2차 방정식의 근 해법으로 풀면 고장거리 x 에 대한 값을 얻을 수 있다.

$$R_f = - \frac{x \times \text{Im}(K_1) + \text{Im}(K_2)}{\text{Im}(K_3)} \quad (12)$$

$$x^2 + x \times \left[\text{Re}(K_1) - \frac{\text{Re}(K_3) \times \text{Im}(K_1)}{\text{Im}(K_3)} \right] + \left[\text{Re}(K_2) - \frac{\text{Re}(K_3) \times \text{Im}(K_2)}{\text{Im}(K_3)} \right] = 0 \quad (13)$$

(단, $0 \leq x \leq 1$)

3.2 양단 2회선

고장전류와 고장회선 및 건전회선의 영상전류를 전류 분포계수를 이용하여 고장상의 정보만으로 나타내면, 각각 식 (14), (15), (16)과 같이 되고 식 (3)은 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$I_f = \frac{3 \times (I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} \quad (14)$$

$$I_0 = \frac{D_{fault0} \times (I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} \quad (15)$$

$$I_{OM} = \frac{D_{sound0}(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} \quad (16)$$

$$V_{ARy} = xZ_{IL} \left[I_{ARy} + K_r \frac{3D_{fault0}(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} \right] + K_m \frac{3D_{sound0}(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} + R_f \frac{3(I_{ARy} - I_{ALoad})}{2D_{fault1} + D_{fault0}} \quad (17)$$

여기서, $D_{sound0} = \frac{[xZ_{0sn} - (1-x)Z_{0sn}]}{2Z_{0sn} + (Z_{0L} + Z_{0M}) + 2Z_{0sn}}$

: 건전회선 영상전류 분포계수

$D_{fault1} = \frac{(1-x)Z_{1sn} + (1-x)Z_{1L} + (2-x)Z_{1sn}}{2Z_{1sn} + Z_{1L} + 2Z_{1sn}}$

: 고장회선 정상전류 분포계수

	계	수
양단 1회선	$K_1 = - \left[1 + \left\{ \frac{2Z_{1sn} + Z_{0sn}}{Z_{total}} + \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0L}}{Z_{total}} \right\} \times \frac{1}{K_{temp}} + \frac{V_{ARy}}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \left\{ 1 - \left(\frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0L}}{Z_{total}} \right) \times \frac{1}{K_{temp}} \right\} \right]$ $K_2 = \frac{V_{ARy}}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \left[1 + \left\{ \frac{2Z_{1sn} + Z_{0sn}}{Z_{total}} - \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0L}}{Z_{total}} \right\} \times \frac{1}{K_{temp}} \right]$ $K_3 = - \frac{3(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \cdot \frac{1}{K_{temp}}$	$\text{여기서, } K_{temp} = \left[\frac{2Z_{1L} + Z_{0L}}{Z_{total}} + \frac{Z_{0L}}{Z_{total}} + \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0L}}{Z_{total}} \right], \quad Z_{total} = Z_{1sn} + Z_{1L} + Z_{1sn}, \quad Z_{total} = Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0sn}$
병행 2회선	$K_1 = - \left[1 + \left\{ \frac{2Z_{1sn} + Z_{0sn}}{Z_{total}} + \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0sn}}{Z_{total}} + \frac{3K_m(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{Z_{0sn}}{Z_{total}} \right\} \times \frac{1}{K_{temp}} + \frac{V_{ARy}}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \left\{ 1 - \left(\frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0M} + Z_{0sn})}{Z_{total}} - \frac{3K_m(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0sn})}{Z_{total}} \right) \times \frac{1}{K_{temp}} \right\} \right]$ $K_2 = \frac{V_{ARy}}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \left[1 + \left\{ \frac{2Z_{1sn} + Z_{0sn}}{Z_{total}} - \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0M} + Z_{0sn})}{Z_{total}} + \frac{3K_m(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0sn})}{Z_{total}} \right\} \times \frac{1}{K_{temp}} \right]$ $K_3 = - \frac{3(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy} \times Z_{IL}} \cdot \frac{1}{K_{temp}}$	$\text{여기서, } K_{temp} = \left[\frac{2(Z_{1sn} + Z_{1L} + Z_{1sn})}{Z_{total}} + \frac{(Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0M} + Z_{0sn})}{Z_{total}} + \frac{3K_r(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0L} + Z_{0M} + Z_{0sn})}{Z_{total}} - \frac{3K_m(I_{ARy} - I_{ALoad})}{I_{ARy}} \cdot \frac{(Z_{0sn} + Z_{0sn})}{Z_{total}} \right], \quad Z_{total} = 2Z_{1sn} + Z_{1L} + 2Z_{1sn}, \quad Z_{total} = 2Z_{0sn} + (Z_{0L} + Z_{0M}) + 2Z_{0sn}$

표 1. 식 (9)의 각 항의 계수

$$D_{\text{fault0}} = \frac{(1-x)Z_{0sm} + (1-x)(Z_{0L} + Z_{0M}) + (2-x)Z_{0sn}}{2Z_{0sm} + Z_{0L} + Z_{0M} + 2Z_{0sn}}$$

: 고장회선 영상전류 분포계수

식 (9)부터 식 (13)까지 양단 1회선의 경우와 같은 방법으로 전개하면, 고장거리 x에 대한 값을 얻을 수 있다. 양단 1회선과 2회선에서 식 (9)에 대한 각 항의 계수를 표 1에 정리하였다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제시한 고장거리 계산 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 154[kV]급 양단 전원 1회선과 병행 2회선 송전선로를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 고장 데이터를 생성하였다. 고장 데이터는 선로 길이가 25[km]인 송전선에서 양단전원의 전압 위상각 차이가 10°인 경우와 상대단 전원의 임피던스를 두 배로 변화시킨 경우에 a상 지락 사고의 고장점 위치(1.25[km], 2.5[km], 7.5[km], 12.5[km], 17.5[km], 20[km])를 변화시키면서 모의한 경우와 고장 지점 17.5[km]에서 고장 저항(5[Ω], 10[Ω], 15[Ω], 20[Ω], 25[Ω], 30[Ω])을 변화시켜 모의한 경우이다.

표 2와 표 3은 고장저항 20[Ω]에서 고장점 위치를 변화시킨 경우와 계전기 설치점으로부터 17.5[km]지점에서 고장저항을 변화시킨 경우의 고장거리를 계산한 결과이며, 그림 3은 고장저항이 20[Ω]인 경우 각각의 고장점 위치에 대한 양단 2회선의 고장거리 계산 결과를 나타낸 것이다.

표 2. 고장 위치 변화에 따른 고장거리 계산 결과

거리[km]	양단 1회선		양단 2회선	
	계산치[km]	오차[%]	계산치[km]	오차[%]
1.25	1.2499	0.00	1.2603	0.8
2.5	2.5106	0.42	2.4602	1.5
7.5	7.5646	0.86	7.3715	1.72
12.5	12.6189	0.75	12.182	2.5
17.5	17.7234	1.27	17.0224	2.72
20.0	20.4023	2.01	19.6241	1.88

표 3. 고장 저항 변화에 따른 고장거리 계산

저항	양단 1회선		양단 2회선	
	계산치[km]	오차[%]	계산치[km]	오차[%]
5[Ω]	17.6287	0.74	17.0940	2.32
10[Ω]	17.6588	0.91	17.0820	2.39
15[Ω]	17.6970	1.12	17.0524	2.55
20[Ω]	17.7234	1.27	17.0224	2.72
25[Ω]	17.8100	1.77	17.0574	2.53
30[Ω]	17.9056	2.32	17.0345	2.66

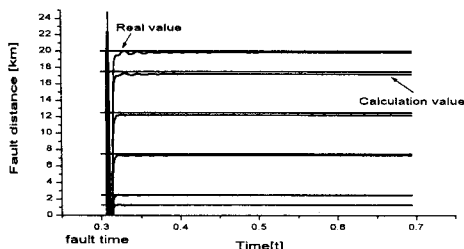


그림 3. 양단 2회선 고장거리 계산

표 4는 상대단 전원의 임피던스를 두 배로 변화시킨 후, 고장저항 20[Ω]에서 고장점 위치를 변화시킨 경우의 고장거리를 계산한 결과이며, 그림 4는 양단 1회선의 고장거리 계산을 나타낸 것이다.

표 4. 고장 위치 변화에 따른 고장거리 계산 결과

거리[km]	양단 1회선		양단 2회선	
	계산치[km]	오차[%]	계산치[km]	오차[%]
1.25	1.2501	0.00	1.2659	1.06
2.5	2.5160	0.64	2.5568	2.27
7.5	7.5530	0.44	7.6359	1.94
12.5	12.6009	0.81	12.7928	2.34
17.5	17.6569	0.87	17.8239	1.85
20.0	20.2218	1.1	20.4663	2.33

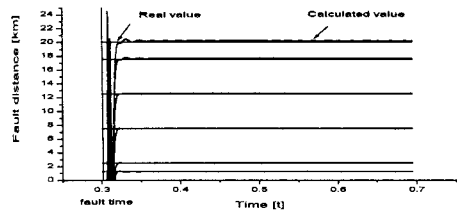


그림 4. 양단 1회선 고장거리 계산

제안한 알고리즘으로 고장거리를 계산한 결과, 오차 3% 이내의 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었다.

5. 결론

일반적으로, 송전선로에서의 고저항 지락고장시 고장점에서의 고장저항과 고장전류, 병행 2회선인 경우의 건전회선의 영상전류는 항상 측정 가능한 것이 아니기 때문에 정확한 고장거리 추정에 있어 오차를 유발시킨다.

본 논문에서는 고장거리 추정에 필요한 고장저항을 고장거리 계산 과정에서 고장거리에 대한 함수로 나타내고, 고장전류와 건전회선의 영상전류는 전류분포계수를 이용한 고장거리에 대한 함수로 나타내어 고장거리를 추정하였다. 고장전류 및 건전회선의 영상전류를 고장상의 정보만을 이용하여 나타냄으로써 건전회선에 대한 정보를 얻지 못할 경우에 대해 고장상의 정보만으로 정확한 고장거리를 계산하였다.

[참고 문헌]

- [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. Phake, "Power System Relaying" 2th edition, Research Studies Press LTD, 1995.
- [3] CIGRE, "Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations", 1991.
- [4] Lief Eriksson, G. D. Rockefeller, "An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in The Fault Resistance Resulting From Remote-End Infeed", IEEE transactions on PAS, Vol. PAS-104, p424-436, No.2, Feb, 1985.