論 文
52A-3-7

# 병행 2회선 송전선로에서 고장점 위치 추정정보를 이용한 실시간 거리계전 알고리즘

# The Real-Time Distance Relay Algorithm Using Fault Location Estimation Information for Parallel Transmission Line

李 在 奎* · 劉 錫 九**
(Jae-Gyu Lee* · Seok-Ku You**)

**Abstract** - This paper presents the real-time implemented distance relay algorithm which the fault distance is estimated with only local terminal information. When a single-phase-to-earth fault on a two-parallel transmission line occurs, the reach accuracy of distance relay is considerably affected by the unknown variables which are fault resistance, fault current at the fault point and zero-sequence current of sound line. The zero-sequence current of sound line is estimated by using the zero sequence voltage which is measured by relaying location. Also, the fault resistance is removed at the process of numerical formula expansion. Lastly, the fault current through a fault point is expressed as a function of the zero-sequence current of fault line, zero-sequence current of sound line, and fault distance. Therefore, the fault phase voltage can be expressed as the quadratic equation of the fault distance. The solution of this quadratic equation is obtained by using a coefficient of the modified quadratic equation instead of using the square root solution method. After the accurate fault distance is estimated, the more accurate impedance is measured by using such an information.

**Key Words** : Distance relay, Local terminal information, Fault distance, Fault current, Square root solution, Sound line, Fault line, Zero-sequence voltage.

## 1. 서 론

거리계전기는 송전선로를 보호하기 위하여 많이 사용하고 있으며, Carrier Scheme이나 전력동요 검출의 근원도 계측된 임피던스를 이용하므로 송전선로 보호에 있어서 없어서는 안 될 매우 중요한 것이다. 그러나 그 중요성에 비하여 거리계전기는 임피던스 계측 방법 즉, 전압과 전류비인 겉보기 임피던스의 크기로 동작하기 때문에 고장 저항이나, 양단 2회선인 경우 고장점으로 흐르는 고장전류, 전원 임피던스의 영향, 그리고 부하의 영향 등에 의하여 오차가 많이 발생한다[1]. 그 오차들 중에서 고장저항과 고장점의 고장전류가 많은 영향을 끼쳐 Underreach 혹은 Overreach 문제를 발생시키므로, 이러한 겉보기 임피던스에 의한 오차를 해결하기 위하여 사변형 특성에서 리액턴스 블라인드의 각도를 조정하거나[2,3], 사변형 Zone에 대한 적응 정정 개념(Adaptive setting concept)을 사용하여 대응하고 있으나[4] 아직 보편적이지 못하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고장점까지의 정확한 임피던스를 구할 수 있다면 겉보기 임피던스의 오차를 줄일 수 있으리라 판단된다.

따라서 본 논문에서는 고장거리 추정 정보를 이용하여 고장점까지의 정확도가 높은 임피던스를 구함으로써, 정정된 사변형 특성대로 동작하는 실시간으로 구현된 수정 거리계전 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한 계통에서 발생하는 미지수에 대하여 자단(local terminal)의 정보만을 이용하여 풀 수 있는 방법을 제시함으로써 실용성에 보다 많은 중점을 두고자 한다.

* 正 會 員 : 大德大學 助敎授
** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2002年 8月 20日
最終完了 : 2003年 2月 17日

## 2. 자단 정보만으로 나타낸 고장상 전압

고장 계산시 계통에서의 미지수는 양단 전원 대칭분 임피던스, 고장거리(x), 고장저항($R_f$), 고장점으로 흐르는 고장전류($I_f$), 그리고 병행 2회선의 건전회선 영상전류($I_{0sound}$)이다. 건전회선의 영상전류는 계전기 설치점에서 계산된 영상분 전압을 이용하여 추정하고, 고장저항은 수식 전개과정에서 제거하여 고장저항의 영향을 제거하였으며, 고장점으로 흐르는 고장전류는 고장회선 영상전류, 건전회선 영상전류, 그리고 고장거리의 함수로 나타내었다. 그 결과, 자단의 정보만을 이용하여 고장상 전압을 고장거리가 미지수인 2차함수로 나타내었다. 많은 시행착오를 되풀이 하여 2차함수의 상수를 적절히 두어 두개의 해 중에서 한 개만이 참 해임을 입증함으로써, 그동안 참 해를 얻기 위해 해왔던 제곱근 혹은 반복적 방법을 제거하여 실시간으로 고장거리를 추정하게 되었다. 마지막으로 추정된 고장거리 x를 이용하여 $R_f$를 추정함으로써 모든 미지량을 구하였다. 따라서 기존의 겉보기 임피던스의 추정방식에서 오차의 원인이 되었던 고장저항, 고장점으로 흐르는 고장전류, 그리고 건전회선의 영상전류를 추정하여 계전

기의 측정전압에서 이들의 전압 강하분을 제거함으로써 계전기 설치점에서 고장점까지의 보다 정확한 임피던스를 추정하였다.

### 2.1 1선 지락시 고장상 전압

그림 1은 1선 지락시 계통 단선도이고, 표 1은 계통 모의를 위한 전원 임피던스와 선로정수이다. 그림 2는 병행 2회선 송전선로에서 모선 P로부터 거리 x만큼 떨어진 지점에서의 1선 지락 고장시, 사고 계통에 대한 각각의 대칭성분 회로를 나타낸 것이다[5, 6].

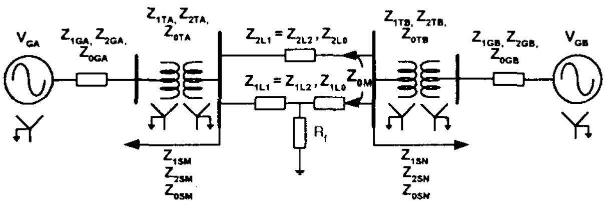


그림 1 1선 지락 사고시 계통 단선도

Fig. 1 One-line diagram of a single phase to earth fault

표 1 전원임피던스와 ACSR 636MCM의 선로정수

Table 1 Source impedance and line constant of ACSR 636MCM

| 구 분 | | 정 상 | 영 상 | 상 호 |
|---|---|---|---|---|
| 전원 임피던스 [Ω] | 배후 전원 | 0.70+j4.95 | 2.10 +j14.85 | - |
| | 상대단 전원 | 0.70+j4.95 | 2.10 +j14.85 | - |
| ACSR 636MCM 선로정수 [Ω/km] | | 0.1006 +j0.4667 | 0.3088 +j1.3094 | 0.2082 +j0.6961 |

여기서, $Z_{SM}$, $Z_{SN}$은 계전기 설치점에서 전원쪽의 등가임피던스이고, 그 값은 표 1의 데이터를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{1SM} = Z_{1TA} + Z_{1GA} = 0.7 + j4.95$$
$$Z_{1SN} = Z_{1TB} + Z_{1GB} = Z_{1SM}$$

$$Z_{2SM} = Z_{2TA} + Z_{2GA} = 0.7 + j4.95$$
$$Z_{2SN} = Z_{2TB} + Z_{2GB} = Z_{2SM}$$

$$Z_{0SM} = Z_{0TA} + Z_{0GA} = 2.1 + j14.85$$
$$Z_{0SN} = Z_{0TB} + Z_{0GB} = Z_{0SM}$$

$$Z_{1L1} = Z_{1L2} = 0.1006 + j0.4667$$

$$Z_{2L1} = Z_{2L2} = 0.1006 + j0.4667$$

$$Z_{0L1} = Z_{0L2} = 0.3088 + j1.3094$$
$$Z_{0M} = 0.2082 + j0.6961$$

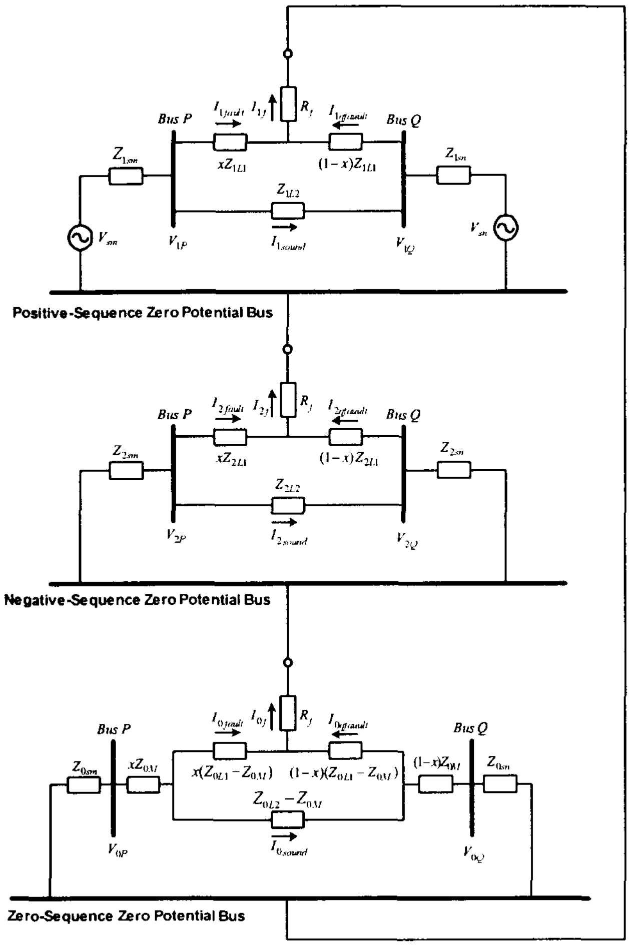

그림 2 1선 지락시 대칭분 등가회로

Fig. 2 Equivalent symmetrical component circuit of a single phase to earth fault

모선P의 계전기 설치점 고장전압은 $V_{RY} = V_{1P} + V_{2P} + V_{0p}$로 나타낼 수 있고, 부하전류가 포함된 각각의 정상, 역상, 영상분 전압은 식 (1)과 같다[7].

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

여기서, $I_{load}$는 고장회선에 흐르는 고장전 부하전류이다.

병행 2회선 송전선로의 경우, 대부분 동일한 특성을 갖는 도체를 사용하므로 각 회선의 정상 임피던스와 역상 임피던스는 같다. 그러므로 선로 임피던스 관계를 식 (2)와 같이 놓

을 수 있다.

$$Z_{0L1} = Z_{0L2} = Z_{0L}$$
$$Z_{1L1} = Z_{2L1} = Z_{1L2} = Z_{2L2} = Z_{1L} \quad (2)$$

따라서, 계전기 설치점에서 순수한 고장전류와 부하전류가 포함된 고장상 계측전압은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, $V_{RY}$ : 계전기 설치점에서 계측한 고장상 전압

$I_{RY}$ : 계전기 설치점에서 계측한 고장상 전류,

$I_{RY} = I_{0fault} + I_{1fault} + I_{2fault} + I_{load}$

$I_f$ : 고장점으로 흐르는 고장전류,

$I_f = I_{1f} + I_{2f} + I_{0f}$

$I_{0fault}$ : 고장회선의 영상전류,

$I_{0fault} = \frac{I_{RAfault} + I_{RBfault} + I_{RCfault}}{3}$

$I_{0sound}$ : 건전회선의 영상전류,

$I_{0sound} = \frac{I_{RAsound} + I_{RBsound} + I_{RCsound}}{3}$

$I_{RAfault}$ / $I_{RBfault}$ / $I_{RCfault}$ : 고장회선에서 계전기가 측정한 A/B/C상 고장전류

$I_{RAsound}$ / $I_{RBsound}$ / $I_{RCsound}$ : 건전회선에서 계전기가 측정한 A/B/C상 고장전류

$K_r$ : Residual compensation factor,

$K_r = \frac{(Z_{0L} - Z_{1L})}{3Z_{1L}}$

$K_m$ : Mutual compensation factor,

$K_m = \frac{Z_{0M}}{3Z_{1L}}$

식 (3)으로부터 고장거리 x를 구하기 위해 x에 관해 정리하면 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \frac{(V_{Ry} - R_f \times I_f)}{Z_{1L}[I_{Ry} + K_r \times 3I_{0fault} + K_m \times 3I_{0sound}]} \quad (4)$$

고장저항, 고장점의 고장전류, 그리고 건전회선의 영상전류가 미지수이기 때문에 식 (4)을 이용하여 고장거리를 계산하면 오차가 커진다. 거리계전기는 자단의 정보를 이용하여 보호를 하므로, 고장점으로 흐르는 고장전류는 통신 등의 다른 매체가 없으면 계측이 매우 어렵다고 판단된다. 따라서 보다 정확한 고장거리를 추정하기 위해서는 고장점으로 흐르는 고장전류를 자단의 고장전류의 함수로 바꾸는 것이 필요하다.

### 2.2 건전회선의 영상분 전류 추정

식 (3)에서 $V_{RY}$, $I_{RY}$, $I_{0fault}$는 계전기에서 측정할 수 있고, $Z_{1L}$, Kr, Km은 선로의 정상분 임피던스와 영상분 임피던스로 구할 수 있다. 따라서 미지수는 고장거리(x), 고장저항(Rf), 고장점으로 흐르는 고장전류($I_f$), 그리고 건전회선의 영상분 전류($I_{0sound}$)이다. 문제의 핵심은 기지의 전기량을 이용하여 이들 미지수를 줄이는 방법을 찾는 것이다. 먼저 건전회선의 영상분 전류를 추정하고자 한다.

병행 2회선에 있어서 계전기의 설치 위치는 모선에 매우 가까우므로 고장시 고장회선의 모선전압과 건전회선의 모선전압은 같다. 따라서 고장회선에서의 영상분 전압은 계측전압을 이용하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{R0} = \frac{V_{RAfault} + V_{RBfault} + V_{RCfault}}{3} \quad (5)$$

식 (5)의 전압은 그림 2의 영상분 회로에서 P 모선의 영상분 전압( $V_{0P}$)인 식 (6)과 같다. 식 (6)은 P모선에서 전원쪽으로 바라본 영상분 전압이다.

$$V_{0P} = -(I_{0fault} + I_{0sound}) \times Z_{0SM} = V_{R0} \quad (6)$$

그 결과, 건전회선의 영상분 전류 $I_{0sound}$는 식 (7)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{0sound} = \frac{-V_{R0}}{Z_{0SM}} - I_{0fault} \quad (7)$$

여기서 $Z_{0SM}$는 계전기의 전원쪽 영상분 임피던스이다. 최근의 디지털 보호계전기는 종합 보호 제어 시스템으로 구성되어지는 추세이므로, 계통의 구성이 달라질 때마다 종합 보호 제어 시스템을 이용하여 $Z_{0SM}$의 값을 예측할 수 있다. 그러나 가장 쉽고 정확한 방법은 건전회선의 영상전류를 직접 계측하는 것이다.

### 2.3 고장점으로 흐르는 영상분 고장전류 추정

양단 전원의 경우, 상대단에서 유입되는 고장전류 때문에 고장점으로 흐르는 고장전류를 구할 수 없다. 그러나 거리계전기는 자단의 정보만을 이용하므로 고장점으로 흐르는 고장전류를 자단의 정보만으로 표현하는 방법을 찾는 것은 쉽지가 않다. 이러한 문제는 그림 2의 영상분 회로에서 해결의 실마리를 찾을 수 있다. 즉, 영상분 전압은 오직 영상분 전류와 영상분 임피던스에만 영향을 받으므로 폐루프에 대해 KVL을 적용하면 식 (8)을 얻을 수 있고, 고장점으로 흐르는 영상분 전류는 식(9)과 같다[8].

$$\begin{aligned} &I_{0sound} \cdot (Z_{0L2} - Z_{0M}) + I_{0qfault} \cdot (1-x)(Z_{0L1} - Z_{0M}) \\ &- I_{0fault} \cdot x(Z_{0L1} - Z_{0M}) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_{0f} = I_{0fault} + I_{0qfault} \tag{9}$$

식 (8)과 식 (9)에서, 모선 Q로부터 고장점으로 흐르는 영상분 고장전류 $I_{0qfault}$항을 제거할 수 있으며, 병행 송전선로에서 고장회선과 건전회선의 선로 영상분 임피던스를 같다고 놓았기 때문에, 고장점에서의 고장전류에 대한 영상분 전류를 식 (10)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$I_{0f} = \frac{I_{0fault}(Z_{0L1} - Z_{0M}) - I_{0sound}(Z_{0L2} - Z_{0M})}{(1-x)(Z_{0L1} - Z_{0M})} = \frac{I_{0fault} - I_{0sound}}{(1-x)} \tag{10}$$

식 (10)는 고장점으로 흐르는 고장전류를 상대단의 고장전류 정보 없이 자단에서 계측 가능한 고장전류로 표현하였다는 것이다. 즉, 고장회선의 영상전류($I_{0fault}$)와 건전회선의 영상전류($I_{0sound}$), 그리고 고장거리의 함수로 고장점의 고장전류를 나타내었다. 그런데, 1선 지락사고에 대한 고장전류의 대칭성분 관계는 $I_{1f} = I_{2f} = I_{0f} = \frac{I_f}{3}$이므로 이를 모선 P의 계전기 설치점에서 측정된 전압식인 식 (3)에 대입하여 고장점의 고장전류 항을 제거하면 식(11)과 같이 고장상 전압을 자단의 정보만으로 표현할 수 있다.

$$V_{Ry} = xZ_{1L}[I_{Ry} + K_r \times 3I_{0fault} + K_m \times 3I_{0sound}] + \frac{3R_f(I_{0fault} - I_{0sound})}{(1-x)} \tag{11}$$

결국 미지수는 x와 고장저항이 남았지만 식 (11)은 실수부와 허수부로 구성되어 있으므로 수식 전개과정에서 고장저항을 제거할 수 있다. 따라서 미지수는 x만 남는데, 이 x는 2차 함수이다. 지금까지는 고장거리 x가 2차 함수이므로, 반복법을 이용하거나 또는 2차 연립방적식을 풀어 두 개의 해 중에서 주어진 조건을 이용하여 하나의 해를 구하는 방법이기 때문에 실시간 구현에 많은 장애가 되었다.

## 3. 실시간으로 구현된 수정 거리계전 알고리즘

식 (11)을 고장거리의 함수로 나타내는 방법은 여러 가지이나 실시간 구현이 가능하도록 하기 위하여 두개의 해 중 한 개의 해가 실제 고장시 고장거리를 나타낸다는 것을 입증하고자 한다.

고장거리 x는 2차 방정식이므로 해가 두개 나올 것이고, 그 해 중에서 0과 1 사이의 값(선로의 전체길이를 1로 하였기 때문)인 해가 진짜 해가 되므로 다른 하나의 해를 수식전개 과정에서 강제적으로 1이 되게 하는 것이다. 물론 이 결과는 단순한 것이지만 많은 시행착오를 통하여 얻은 좋은 결과이고, 이러한 결과로 인하여 본 논문이 실시간으로 거리계전 알고리즘을 구현할 수 있게 된 것이다.

### 3.1 이차방정식에서 단일해 구하는 알고리즘

먼저 이차방정식의 일반식은 식 (12)과 같다.

$$ax^2 + bx + c = 0 \tag{12}$$

여기서 a = 1, 그리고 b + c = -1이 되도록 식 (12)을 x에 대하여 2차 함수로 전개하면 해는 다음 식에서 구할 수 있고, 그 x의 해를 $x_1$, $x_2$라 하면

$$\begin{aligned} x &= \frac{-b \pm \sqrt{(b^2 - 4ac)}}{2a} \\ x_1 &= \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4\times1\times(-b-1)}}{2\times1} = \frac{-b + \sqrt{b^2+4b+4}}{2} = 1 \\ x_2 &= \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4\times1\times(-b-1)}}{2\times1} = \frac{-b - \sqrt{b^2+4b+4}}{2} = -b - 1 \end{aligned} \tag{13}$$

그러므로 $x_2$ = -b -1이 진짜 해 인 것이 증명되었고, b + c = -1의 관계에서 c = -b -1이므로 결국 참 해는 간단히 c로 구할 수 있다.

이제 위의 결과를 적용하기 위하여, 식 (12)에서 a = 1, b + c = -1의 관계가 되도록 식 (11)을 식 (14)과 같이 변형한다[3].

$$x^2 + K_1 \times x + K_2 + K_3 \times R_f = 0 \tag{14}$$

여기서,

$$K_1 = -\left[1 + \frac{V_{Ry}}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{0p1} + Z_{0M} \cdot I_{0p2}}\right]$$

$$K_2 = \left[\frac{V_{Ry}}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{0p1} + Z_{0M} \cdot I_{0p2}}\right]$$

$$K_3 = -\left[\frac{3 \cdot (I_{0p1} - I_{0p2})}{Z_{1L} \cdot I_{Ry} + (Z_{0L} - Z_{1L}) \cdot I_{0p1} + Z_{0M} \cdot I_{0p2}}\right]$$

이를 각각 실수부와 허수부로 분리하면 식 (15)과 식 (16)이 되고, 식 (16)을 $R_f$에 대해 정리한 후, 식 (15)에 대입하면 식 (17)와 같이 고장거리 x에 대한 2차 방정식을 얻을 수 있다.

$$x^2 + Re(K_1) \times x + Re(K_2) + Re(K_3) \times R_f = 0 \tag{15}$$

$$Im(K_1) \times x + Im(K_2) + Im(K_3) \times R_f = 0 \tag{16}$$

$$x^2 + x \times \left[ Re(K_1) - \frac{Re(K_3) \times Im(K_1)}{Im(K_3)} \right] + \left[ Re(K_2) - \frac{Re(K_3) \times Im(K_2)}{Im(K_3)} \right] = 0 \quad (17)$$

식 (17)를 식 (12)와 비교하면

$$b = \left[ Re(K_1) - \frac{Re(K_3) \times Im(K_1)}{Im(K_3)} \right],$$

$$c = \left[ Re(K_2) - \frac{Re(K_3) \times Im(K_2)}{Im(K_3)} \right] \text{ 이므로}$$

$K_1$,$K_2$, 그리고 $K_3$를 이용하여 수식을 전개하면 $b + c = 1$ 됨을 검증할 수 있다. 마지막으로, 식 (13)에서 $x_2 = -b - 1$ 와 $b + c = -1$의 관계를 이용하면 고장거리 x는 식 (18)으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$x = c = Re(K_2) - \frac{Re(K_3) \times Im(K_2)}{Im(K_3)} \quad (18)$$

여기서, 추정된 고장거리 x는 선로의 전체 길이를 1로 두어 계산하였기 때문에, 양 단자사이의 거리를 곱하면 실제 고장거리를 구할 수 있다. 제시된 고장거리 추정의 정확성은 사례연구에서 검증하였다.

### 3.2 추정된 고장거리를 이용한 수정 거리계전 알고리즘

거리를 추정함으로써 차단 정보만을 이용한 고장상 전압의 모든 미지수가 풀렸다. 고장점까지의 임피던스는 추정된 고장거리에 선로의 임피던스를 곱하면 구할 수 있다. 그러나 사변형 거리계전기의 경우, 고저항에 대한 검출능력을 향상시키기 위해 R축의 값을 선로의 저항값 보다 크게 정정한다. 또한 이 임피던스는 전력동요 검출에서도 이용되고 있다. 따라서 사변형 거리계전기의 경우, 그 동작원리가 정정된 임피던스(R,X)와 추정된 임피던스를 비교하여 동작하는 것이므로 임피던스 즉, 저항 값과 리액턴스 값으로 나타내는 것이 보다 실용적이다. 지금까지 거리계전기의 임피던스는 계전기가 측정한 고장상 전압인 식(11)과 고장회선과 건전회선의 영상분 전류가 보상된 식 (19)을 이용하여 임피던스를 식 (20)과 같이 구할 수 있다.

$$I = I_{Ry} + K_r \times 3I_{0fault} + K_m \times 3I_{0sound} \quad (19)$$

$$R_{old} = \left[ \frac{Re(V_{Ry}) \times Re(I) + Im(V_{RY}) \times Im(I)}{Re(I) \times Re(I) + Im(I) \times Im(I)} \right]$$

$$X_{old} = \left[ \frac{Im(V_{Ry}) \times Re(I) - Re(V_{RY}) \times Im(I)}{Re(I) \times Re(I) + Im(I) \times Im(I)} \right] \quad (20)$$

이러한 방법의 임피던스 계산은 계전기가 측정한 전압인 식(11)에서 고장점으로 흐르는 고장전류에 의한 전압강하분과 건전회선 영상전류에 의한 전압강하분이 포함되어 있기 때문에 겉보기 임피던스 오차 문제점을 해결할 수 없다. 그 이유는 고장점으로 흐르는 고장전류에 의한 전압 강하분을 보상할 수 없어 고장저항이 증가할수록 겉보기 임피던스 계측에 오차가 발생하기 때문이다. 따라서 이러한 전압강하분을 측정된 고장상 전압에서 제거하면 거리계전기는 보다 정확한 임피던스(R,X)를 구할 수 있다.

$$R_f = -\frac{[x \times Im(K_1) + Im(K_2)]}{Im(K_3)} \quad (21)$$

그래서 고장점의 고장전류에 의한 전압강하분을 보상하기 위하여, 먼저 고장거리 x를 이용하여 식 (16)에서 $R_f$를 구하면 식 (21)과 같다.

$$V_{new} = V_{Ry} - xZ_{0M}I_{0sound} - \frac{3R_f(I_{0fault} - I_{0sound})}{(1-x)} \quad (22)$$

$$I_{new} = I_{Ry} + \frac{(Z_{0L} - Z_{1L})}{Z_{1L}} I_{0fault} \quad (23)$$

$$R_{new} = \left[ \frac{Re(V_{est}) \times Re(I_{est}) + Im(V_{est}) \times Im(I_{est})}{Re(I_{est}) \times Re(I_{est}) + Im(I_{est}) \times Im(I_{est})} \right]$$

$$X_{new} = \left[ \frac{Im(V_{est}) \times Re(I_{est}) - Re(V_{est}) \times Im(I_{est})}{Re(I_{est}) \times Re(I_{est}) + Im(I_{est}) \times Im(I_{est})} \right] \quad (24)$$

마지막 단계로 보다 정확한 임피던스를 추정하기 위하여 필요한 새로운 전압, 전류를 구하자 한다. 그 방법으로 식 (11)의 고장상에서 계측된 전압에서 건전회선 영상분 전류에 의한 전압강하분과 고장점의 고장전류에 의한 전압강하분을 제거한 새로운 전압( $V_{new}$)과, 우리 계통에서는 건전회선의 영상전류를 사용하지 않으므로 고장회선 영상분 전류만을 보상한 전류( $I_{new}$)를 식 (22)와 식 (23)처럼 구한다. 이들 식을 이용하여, 새로운 임피던스( $R_{new}$, $X_{new}$)를 추정하는 수정 거리계전 알고리즘을 식 (24)에서 제시하였다. 또한 식 (24)는 임피던스 추정을 실시간으로 구현할 수 있도록 하여 실용성에 많은 중점을 두었다. 기존의 임피던스 계측방법인 식 (20)보다 본 연구에서 제시한 식 (24)로 추정된 임피던스가 보다 더 정확함을 사례연구에서 검증하였다.

## 4. 사례연구

본 논문에서 제시한 고장거리 추정 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°로 두어 조류가 모선 P로부터 유출되도록 하였다. 고장점 위치를 전체 선로의 5%, 10%, 30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%로 변화시키면서, 또한 80% 고장점 위치에서 고장저항을 5[Ω], 10[Ω], 15[Ω], 20[Ω], 25[Ω], 30[Ω]으로 변화시키면서 모의하였다. 마지막으로 계통의 전원 임피던스가 변하였을 때의 영향을 검토하기 위하여 배후 전원 임피던스와

상대단 전원 임피던스의 크기를 2배, 3배, 5배로 변화시키면서 각각 모의하였다.

### 4.1 고장점의 위치 변화

고장저항이 작을 경우, 고장저항의 영향과 부하 임피던스의 영향을 보다 적게 받는다. 따라서 이러한 점을 고려하여 표 2에서는 고장저항을 25[Ω]으로 하여, 고정점 위치를 변화시키면서 모의하였다. 특히 거리계전요소의 Zone 1정정치 범위인 70%에서 85% 고정점에서는 5%단위로 증가시키면서 모의하였다. 표 2에서 나타나듯이 고장점 위치 변화에 따른 추정 오차는 약 ±3%이내이다.

표 2 고장점 위치 변화에 따른 고장거리 추정

Table 2 Fault distance estimation according to fault location variation

| 거 리[km] | | 추정치[km] | 오 차[%] |
|---|---|---|---|
| 5% | 1.25 | 1.257 | -0.56 |
| 10% | 2.5 | 2.457 | 1.72 |
| 30% | 7.5 | 7.271 | 3.05 |
| 50% | 12.5 | 12.241 | 2.07 |
| 70% | 17.5 | 17.341 | 0.91 |
| 75% | 18.75 | 18.783 | -0.17 |
| 80% | 20.0 | 20.183 | -0.91 |
| 85% | 21.25 | 21.888 | -3.00 |

### 4.2 고장저항의 변화

동일한 고장점 위치에서 고장저항이 변화할 때, 고장점 추정의 정확도를 나타내고자 한다. 표 3은 계전기 설치점으로부터 20[km]지점에서 고장저항을 5[Ω], 10[Ω], 15[Ω], 20[Ω], 25[Ω], 30[Ω]으로 변화시키면서 모의한 경우의 고장거리 추정 결과이다. 표 3에서 나타나듯이 고장저항 변화에 따른 오차는 ±2% 이내이다.

표 3 고장저항 변화에 따른 고장거리 추정

Table 3 Fault distance estimation according to fault registance variation

| 고 장 저 항[Ω] | 추정치[km] | 오 차[%] |
|---|---|---|
| 5 | 19.777 | 1.11 |
| 10 | 19.873 | 0.63 |
| 15 | 19.964 | 0.18 |
| 20 | 20.047 | -0.23 |
| 25 | 20.191 | -0.95 |
| 30 | 20.355 | -1.77 |

표 3에서 나타난 것처럼, 제안된 알고리즘에서는 미지수인 고장저항에 대한 항이 계산 과정(식 15, 16, 17)중에 제거되므로, 고장거리 추정시 고장저항의 변화에 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

### 4.3 전원 임피던스의 변화

전원 임피던스의 변화에 따른 고장점 추정에 대한 정확성을 검증하기 위하여 전원 임피던스를 2가지 방법으로 변화시켰다.

첫째 : 배후 전원 임피던스의 크기를 2배, 3배, 그리고 5배를 변화시키면서 각각에 대하여 고장저항은 25[Ω], 고장점 위치는 5%, 10%, 30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%로 변화시키면서 모의

둘째 : 상대단 전원 임피던스의 크기를 2배, 3배, 그리고 5배를 변화시키면서 각각에 대하여 고장저항은 25[Ω], 고장점 위치는 5%, 10%, 30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%로 변화시키면서 모의

#### 4.3.1 배후 전원 임피던스의 변화

표 4는 배후전원 임피던스의 변화에 따른 고장거리 추정결과이다. 표 4에서 보듯이 배후전원 임피던스가 커짐에 따라 오차가 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 배후 전원 임피던스가 5배인 경우, 오차가 4.32%까지 올라가지만 실 적용시 큰 오차 범위가 아니라고 사료된다.

표 4 배후 전원임피던스 변화에 따른 고장거리추정

Table 4 Fault distance estimation according to rear source impedance variation

| | 배후 전원 임피던스 변화 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2배 | | 3배 | | 5배 | |
| 거 리 [km] | 추정치 [km] | 오 차 [%] | 추정치 [km] | 오 차 [%] | 추정치 [km] | 오 차 [%] |
| 1.25 | 1.265 | -1.2 | 1.296 | -3.68 | 1.283 | -2.64 |
| 2.5 | 2.458 | 1.68 | 2.444 | 2.24 | 2.453 | 1.88 |
| 7.5 | 7.25 | 3.33 | 7.241 | 3.45 | 7.176 | 4.32 |
| 12.5 | 12.145 | 2.84 | 12.135 | 2.92 | 12.066 | 3.47 |
| 17.5 | 17.287 | 1.21 | 17.336 | 0.93 | 17.135 | 2.08 |
| 18.75 | 18.84 | -0.48 | 18.984 | -1.24 | 18.957 | -1.10 |
| 20 | 20.092 | -0.46 | 20.042 | -0.21 | 19.791 | 1.04 |
| 21.25 | 21.763 | -2.41 | 21.966 | -3.36 | 22.04 | -3.71 |

#### 4.3.2 상대단 전원 임피던스의 변화

표 5는 고장저항을 20[Ω]으로 고정시킨 후, 상대단 전원의 임피던스와 고장점 위치를 변화시면서 모의한 경우의 고장거리 추정 결과이고 그 오차는 ±3%이하이다. 배후 전원 임피던스 변화보다 오차가 적은 것은 상대단 전원 임피던스가 커질수록 상대단에서 유입되는 고장전류가 작아서 상대적으로 영향을 작게 받은 것으로 사료된다.

표 5 상대단 전원임피던스변화에 따른 고장거리추정
**Table 5** Fault distance estimation according to remote terminal source impedance variation

| | 상대단 전원 임피던스 변화 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2배 | | 3배 | | 5배 | |
| 거 리 [km] | 추정치 [km] | 오 차 [%] | 추정치 [km] | 오 차 [%] | 추정치 [km] | 오 차 [%] |
| 1.25 | 1.244 | 0.48 | 1.242 | 0.64 | 1.241 | 0.72 |
| 2.5 | 2.453 | 1.88 | 2.453 | 1.88 | 2.46 | 1.6 |
| 7.5 | 7.317 | 2.44 | 7.333 | 2.22 | 7.356 | 1.92 |
| 12.5 | 12.265 | 1.88 | 12.3 | 1.60 | 12.328 | 1.37 |
| 17.5 | 17.37 | 0.74 | 17.388 | 0.64 | 17.414 | 0.49 |
| 18.75 | 18.689 | 0.32 | 18.68 | 0.37 | 18.805 | -0.29 |
| 20 | 20.049 | -0.24 | 20.123 | -0.61 | 20.138 | -0.69 |
| 21.25 | 21.499 | -1.17 | 21.519 | -1.26 | 21.441 | -0.89 |

이상과 같이 전원 임피던스 변화에 대한 영향을 검토하기 위하여 배후 전원 임피던스, 상대단 전원 임피던스 변화에 대하여 모의한 결과, 고장거리 추정의 오차는 ±3%이내이므로 실적용상 큰 문제가 없으리라 사료된다. 이러한 결과의 가장 주된 이유는 제안된 알고리즘에서 고장 거리를 추정하기 위하여 사용되는 파라미터는 식 (14)에서 기지량의 선로정수 ( $Z_{1L}, Z_{0M}$)만을 사용하기 때문인 것으로 사료되며, 다른 문헌에서도 이러한 전원 임피던스의 영향이 크지 않다는 것이 보고 되고 있다[9,10].

### 4.4 수정된 거리계전 알고리즘에 의한 임피던스 추정

지금까지 검증된 고장거리 추정정보(±3%이내)를 이용하여 고장저항 $R_f$를 구한 후, 계전기가 측정한 고장상 전압에서 고장저항과 상호 임피던스에 의한 영향을 제거한 새로운 임피던스 계측치와 기존의 임피던스 계측치를 비교함으로써 새로운 임피던스 계측방법이 더 우수하다는 것을 검증하고자 한다. 정확성을 검증하기 위한 기준으로 이론적인 계산 방법 즉, 대칭좌표법을 이용하고자 한다. 물론 대칭좌표법을 이용한 고장계산의 정확성을 검증하기 위하여, PSCAD/EMTDC에서 모의한 고장 데이터를 이용하여 고장계산이 정확히 되었다는 것을 표 6, 7에서 입증하였다. 표 6의 고장시 각 상 전압과 표 7의 고장시 각 상 전류에서 나타나듯이 그 오차는 최대 ±1.785%이내이다. 따라서 대칭좌표법으로 계산된 전압, 전류는 신뢰를 할 수 있다고 사료되며, 또한 그 정보를 이용한 임피던스 계산 역시 신뢰할 수 있으리라 사료된다. 여기서 고장전류의 오차가 고장전압 오차보다 조금 더 크게 보이는 것은 전압 크기보다 상대적으로 전류 크기가 작아 전류의 작은 차이에도 오차가 크게 나타났기 때문이고, 표 6, 7의 오차는 식 (25)를 이용하였다.

$$오차[\%] = \left[ \frac{대칭좌표법계산치 - 실시간프로그램계산치}{대칭좌표법계산치} \right] \times 100 \quad (25)$$

3.1절에서 제시한 변형된 2차 방정식의 상수 항(b, c)과 2개의 해(x1, x2)중에서 한 개의 해(x1)를 1로 강제적으로 고정시킴으로써 나머지 한 개의 해(x2 = c)가 참해임을 입증하였다. 표 8에서는 이러한 상수 항과 해에 대하여 대칭좌표법 계산치와 실시간 구현 프로그램 계산치에서도 예상된 결과치로 나오고 있음을 보여주고 있다.

표 9는 이론 계산법인 대칭좌표법으로 고장점 위치와 고장점 저항의 변화에 따라 기존의 임피던스($R_{old}$, $X_{old}$) 계산치와 수정된 임피던스($R_{new}$, $X_{new}$) 계산치의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 표 9에서 전체선로 길이의 80%지점에서 고장저항 15[Ω]과 완전 지락의 0[Ω](모의시, EMTDC의 RUNTIME 최소값인 0.005 [Ω]사용)에 대한 임피던스 계산치를 비교하면 수정된 거리계전 알고리즘이 우수하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

완전지락이 경우, 기존의 임피던스 계산치와 새로운 임피던스 계산치 사이에는 거의 차이가 없다. 이것은 고장저항의 영향이나 부하전류의 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 그러나 고장저항이 커질수록 기존의 임피던스 계산치 오차는 매우 커지지만 새로운 임피던스 계산치의 오차는 매우 작음을 알 수 있다. 그 이유는 식 (11)에서 알 수 있듯이 고장저항이 작을 경우 $R_f$에 관련된 항이 수식적으로 거의 영이 되므로 오차가 없지만, 고장저항이 증가하면 고장저항과 고장점으로 흐르는 고장전류에 의한 전압 강하분 만큼 오차가 생긴다는 것을 알 수 있다. 그러나 보다 근본적인 이유는 기존의 방법은 고장점으로 흐르는 고장전류와 고장점 저항을 추정할 수 없었기 때문에 그에 대한 전압강하분을 보상할 수 없다.

표 6 1선 지락시 각 상 고장 전압
**Table 6** Each phase fault voltage with a single phase to earth fault

| | 대칭좌표법 계산치와 실시간 구현 프로그램 계산치의 비교 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 고장 위치 : 30%지점 고장저항 : 10[Ω] | | | 고장 위치 : 75%지점 고장저항 : 15[Ω] | | | 고장 위치 : 80%지점 고장저항 : 15[Ω] | | | 고장 위치 : 80%지점 고장저항:완전지락 0[Ω] | | |
| 전 압 [kV] | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오 차 [%] | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오 차 [%] | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오 차 [%] | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오 차 [%] |
| Va | 71.221 | 71.368 | -0.206 | 81.605 | 81.692 | -0.107 | 82.152 | 81.381 | 0.938 | 53.918 | 53.995 | 1.711 |
| Vb | 100.67 | 100.80 | -0.128 | 94.503 | 94.576 | -0.077 | 94.159 | 93.335 | 0.875 | 96.879 | 96.117 | 0.786 |
| Vc | 85.764 | 85.704 | 0.070 | 85.648 | 85.636 | 0.014 | 85.682 | 84.876 | 0.940 | 94.404 | 93.603 | 0.848 |

표 7 1선 지락시 각 상 고장 전류

**Table 7** Each phase fault current with a single phase to earth fault

| | 대칭좌표법 계산치와 실시간 구현 프로그램 계산치의 비교 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 고장 위치 : 30%지점<br>고장저항 : 10[Ω] | | | 고장 위치 : 75%지점<br>고장저항 : 15[Ω] | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 15[Ω] | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 :완전지락 0[Ω] | | |
| 전 류<br>[kA] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] |
| Ia | 3.667 | 3.642 | 0.681 | 1.200 | 1.19 | 0.833 | 1.044 | 1.035 | 0.833 | 3.278 | 3.265 | 0.396 |
| Ib | 0.479 | 0.471 | 1.670 | 0.490 | 0.481 | -0.417 | 0.490 | 0.482 | 1.693 | 0.532 | 0.523 | 1.635 |
| Ic | 0.504 | 0.496 | 1.587 | 0.468 | 0.461 | 1.495 | 0.465 | 0.457 | 1.720 | 0.445 | 0.437 | 1.819 |
| Io | 1.341 | 1.332 | 0.671 | 0.511 | 0.507 | 0.782 | 0.457 | 0.454 | 0.808 | 1.054 | 1.051 | 0.237 |
| Iom | 0.112 | 0.11 | 1.785 | 0.108 | 0.107 | 0.925 | 0.132 | 0.131 | 0.532 | 0.303 | 0.302 | 0.231 |

표 8 변형된 2차 방정식의 상수와 해

**Table 8** Coefficient and solution of the modified quadratic equation

| | 대칭좌표법 계산치와 실시간 구현 프로그램 계산치의 비교 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 고장 위치 : 30%지점,<br>고장저항 : 10[Ω]<br>$R_{actual}=0.754$<br>$X_{actual}=3.500$ | | | 고장 위치 : 75%지점,<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=1.886$<br>$X_{actual}=8.750$ | | | 고장 위치 : 80%지점,<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=2.012$<br>$X_{actual}=9.334$ | | | 고장 위치 : 80%지점,<br>고장저항:완전지락 0[Ω]<br>$R_{actual}=2.012$<br>$X_{actual}=9.334$ | | |
| 고장거리<br>및<br>임피던스 | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] | 대칭<br>좌표법 | 실시간<br>프로그램 | 오 차<br>[%] |
| b | -1.300 | -1.291 | 0.692 | -1.750 | -1.744 | 0.343 | -1.800 | -1.798 | 0.111 | -1.800 | -1.788 | 0.667 |
| c | 0.300 | 0.291 | 3.000 | 0.750 | 0.744 | 0.800 | 0.800 | 0.798 | 0.250 | 0.800 | 0.788 | 1.500 |
| x1 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 |
| x2 | 0.300 | 0.291 | 3.000 | 0.750 | 0.744 | 0.800 | 0.800 | 0.798 | 0.250 | 0.800 | 0.788 | 1.500 |

표 9 대칭좌표법 계산에 의한 임피던스 계산치

**Table 9** Impedance calculation value according to symmetrical coordinates method

| 이론적인 방법인 대칭좌표법 계산치 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 고장 위치 : 30%지점<br>고장저항 : 10[Ω]<br>$R_{actual}=0.754, X_{actual}=3.500$ | | | | 고장 위치 : 75%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=1.886, X_{actual}=8.750$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 완전지락 0[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | |
| $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) |
| 11.216 | -1387 | 0.754 | -0.066 | 33.414 | -1690 | 1.8862 | -1.082 | 37.282 | -1752 | 2.012 | 0.000 | 2.022 | -0.492 | 2.012 | 0.000 |
| $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) |
| 4.282 | -22.34 | 3.500 | -0.005 | 12.739 | -45.58 | 8.7506 | -0.006 | 14.038 | -50.40 | 9.334 | 0.000 | 9.335 | -0.009 | 9.334 | 0.000 |

표 10 실시간 구현 프로그램에 의한 임피던스 계산치

**Table 10** Impedance calculation value according to real-time implemented program

| 실시간 구현 프로그램에 의한 임피던스 계산치 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 고장 위치 : 30%지점<br>고장저항 : 10[Ω]<br>$R_{actual}=0.754, X_{actual}=3.500$ | | | | 고장 위치 : 75%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=1.886, X_{actual}=8.750$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 완전지락 0[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | |
| $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) | $R_{old}$ | 오차<br>(%) | $R_{new}$ | 오차<br>(%) |
| 11.219 | -1387 | 0.732 | 2.917 | 33.413 | -1690 | 1.872 | -0.321 | 37.275 | -1752 | 2.008 | 0.198 | 2.022 | -0.497 | 1.982 | 1.491 |
| $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) | $X_{old}$ | 오차<br>(%) | $X_{new}$ | 오차<br>(%) |
| 4.17 | -19.14 | 3.396 | 2.971 | 12.532 | -43.22 | 8.685 | 0.742 | 13.849 | -48.37 | 9.3156 | 0.197 | 9.198 | 1.457 | 9.195 | 1.489 |

표 11 대칭좌표법에 의한 임피던스 계산치와 실시간 구현 프로그램에 의한 임피던스 계산치 오차
Table 11 Error of Impedance estimation between symmetrical coordinates method and real-time implemented program

| 대칭좌표법 계산치와 실시간 구현 프로그램 계산치의 오차 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 고장 위치 : 30%지점<br>고장저항 : 10[Ω]<br>$R_{actual}=0.754, X_{actual}=3.500$ | | | | 고장 위치 : 75%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=1.886, X_{actual}=8.750$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 15[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | | 고장 위치 : 80%지점<br>고장저항 : 완전지락 0[Ω]<br>$R_{actual}=2.012, X_{actual}=9.334$ | | | |
| | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오차 [%] | | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오차 [%] | | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오차 [%] | | 대칭 좌표법 | 실시간 프로그램 | 오차 [%] |
| $R_{diff}$ | 0.754 | 0.732 | 2.92 | $R_{diff}$ | 1.8862 | 1.872 | 0.75 | $R_{diff}$ | 2.012 | 2.008 | 0.2 | $R_{diff}$ | 2.012 | 2.032 | -0.09 |
| $X_{diff}$ | 3.500 | 3.396 | 2.97 | $X_{diff}$ | 8.7506 | 8.685 | 0.75 | $X_{diff}$ | 9.334 | 9.3156 | 0.2 | $X_{diff}$ | 9.334 | 9.335 | -0.02 |

따라서 본 논문에서 제시하고자 하는 수정된 거리계전 알고리즘은 고장거리를 추정하여 고장저항을 보다 정확히 추정함으로써, 고장저항이 커질수록 기존의 알고리즘보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 표 9에서 고장거리(30%와 75%)와 고장점 저항(10[Ω]과 15[Ω])을 바꾸어가면서 대칭좌표법으로 임피던스를 계산한 결과, 수정된 거리계전 알고리즘이 우수하다는 것을 알 수 있다.

표 10은 PSCAD/EMTDC의 모의 데이터를 이용하여 실시간 구현 프로그램에서도 대칭좌표법에서 나타난 결과대로 나타남을 보이고 있다.

표 11은 본 논문에서 제시한 새로운 임피던스 추정 알고리즘에 의해 계산된 임피던스에 대하여, 대칭좌표법(표 9)과 실시간 구현 프로그램(표 10)의 계산치 오차를 비교하여 나타낸 것이다. 표 11에서 대칭좌표법에 의한 임피던스 계산결과와 실시간 구현 프로그램에 의한 임피던스 계산결과는 ±3% 이내의 오차를 보이고 있다. 따라서 이론 계산법인 대칭좌표법과 모의 데이터를 이용하여 실시간으로 구현한 프로그램 사이에서 큰 차이가 없으므로, 본 논문에서 제안한 거리계전 알고리즘은 현장에 적용할 수 있으리라 사료된다.

## 5. 결 론

거리계전기는 송전선로 보호에 있어서 가장 중요한 보호계전요소이나 전압과 전류의 비인 겉보기 임피던스의 크기로 동작을 하기 때문에 오차가 많이 발생한다. 그러므로 고장점까지의 정확한 고장거리를 구한 후, 그 정보를 이용하여 고장점까지의 정확한 임피던스를 구함으로써 겉보기 임피던스의 오차를 크게 감소시켰다. 본 연구의 주요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 1선 지락 고장시 고장상 전압은 자단에서 구할 수 있는 정보만을 이용하여 표현하였다. 그 결과, 고장점으로 흐르는 고장전류는 자단에서 얻을 수 있는 고장회선 영상전류와 건전회선 영상전류, 그리고 고장거리의 함수로 나타내었고, 고장저항은 수식 전개과정에서 제거되므로 결국 고장거리 x가 미지수인 2차 방정식 문제로 단순화 시켰다.

둘째, 많은 시행착오를 되풀이 하여 2차함수의 상수를 적절히 두어 2개의 해 중에서 오직 한 개만이 참해 임을 입증함으로써 그동안 참해를 얻기 위해 해왔던 제곱근 혹은 반복적 방법을 제거하였다. 그 결과, 고장거리 정보를 이용하여 거리계전 알고리즘을 실시간으로 구현할 수 있었다. 추정된 x의 정확성을 검증하기 위하여 다양한 계통 조건에서 모의(Simulation)하여 그 정확성을 입증하였다. 고장거리 오차가 3%(5배의 배후전원 임피던스 변화의 경우 최대 4.32%)정도의 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었다.

셋째, 입증된 고장거리 정보를 이용하여 고장저항($R_f$)를 추정하므로써, 기존의 겉보기 임피던스의 측정방식에서 오차의 원인이 되었던 고장저항, 고장점으로 흐르는 고장전류, 그리고 건전회선의 영상전류를 모두 추정하였다. 그 결과, 고장상 계전기의 측정전압에서 이들의 전압강하분을 제거함으로써 계전기 설치점에서 고장점까지의 보다 정확한 임피던스를 구할 수 있었다. 이 수정된 거리계전 알고리즘의 실시간 구현성을 검증하고, 또한 대칭좌표법에 의한 고장계산이 정확한가를 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC에서 모의 고장 데이터를 생성하였다. 실시간 구현성을 검증하기 위하여, 모의된 데이터로 거리계전 알고리즘을 C언어로 프로그래밍하여 그 결과 값을 비교해 본 결과 정확성이 매우 높았다.

따라서 본 논문에서는 고장시 고장점까지의 정확도가 높은 임피던스를 구함으로써 거리계전기에서 정정된 사변형 특성으로 동작하는 수정된 거리계전 알고리즘을 제시하였다. 또한 거리계전기는 자단 정보만을 이용하여 선로를 보호하는 특성을 가지고 있으므로, 계통에서 발생하는 미지수를 자단의 정보를 이용하여 풀 수 있도록 함과 동시에 실시간으로 구현할 수 있도록 하여 실용성에 많은 중점을 두었다.

## [참 고 문 헌]

[1] 이재규, 정창호, 정병태, 안복신, 김석일, "디지털 거리 계전기의 Zone 설정에 관한 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp946-948, 1999.
[2] "Instruction Manual Digital Distance Relay Scheme Type MDT-F", Mitsubishi, Ver. F, p55-72, 1999.
[3] "REL521 User's Guide", ABB, Distance Protection p1-46, 1996.
[4] Y. Q. Xia, K. K. Li, A. K. David, "Adaptive relay setting for stand-alone digital distance protection", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No1,

January 1994.
[5] Lin Bo Sheng and S. Elangovan, "A Fault Location Method for Parallel Transmission Lines", Electrical Machines and Power Systems, p253-259, 1999.
[6] 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.
[7] W. A. Lewis, L. S. Tippet, "Fundamental Basis for Distance Relaying on 3-Phase Systems", AIEE Transactions, 1947
[8] 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.
[9] 이종범, 이승재, 김철환, 임화영, "직접접지계통 송전선로 고저항 지락보호대책 연구-최종보고서", 전력연구원, p117-203, 1997.
[10] "REL521 User's Guide", ABB, Fault Locator p1-23, 1996.
[11] Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke, "Power System Relaying 2th edition", Research Studies Press LTD, 1995.
[12] James S. Throp and Arun G. Phadke, "Computer Relaying For Power Systems", Research Studies Press LTD, 1988.
[13] 박홍규, 이명수, 이재규, 유석구, "송전선로에서의 고저항 지락고장시 고장거리 추정에 관한 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1363-1365, 1999
[14] 박홍규, 이명수, 이재규, 유석구, "영상회로를 이용한 송전선로에서의 고장점 추정 알고리즘", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.282-284, 1999
[15] 안용진, 강상희, 최면송, 이승재, "전류분배계수를 사용하는 병행 2회선 송전선로 고장점 표정 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No 3, pp.146-152, March 2001.

## 저 자 소 개

**이 재 규(李 在 奎)**

1962년 8월 10일생. 1986년 영남대 전기공학과 졸업. 1990년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 박사과정 수료. 1989년~1999년 LG산전 연구소 선임연구원. 현재 대덕대학 조교수

E-mail : leejg@mail.ddc.ac.kr

**유 석 구(劉 錫 九)**

1938년 10월 31일생. 1961년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 1996년 당학회 회장

E-mail : skyou@mail.hanyang.ac.kr