

최소자승법을 이용한 전력계통의 고장점 표정 알고리즘

A Study on the Fault Location Algorithm for Power System Using a Recursive Least Square Error Method

남시복 (전기설비과)
Si-Bok Nam (Dept. of Electrical Facilities)

Key Words : Fault location algorithm, EMTP, Load flow variation, Fault resistance

ABSTRACT - This paper presents the fault location estimation algorithm in transmission line using a recursive least square error method(RLSE). To minimize the computational burden of the digital relay, a RLSE approach is used. Computer simulation results of the RLSE algorithm seem promising, indicating that it should be considered for further testing and evaluation. The proposed method uses the voltage and current collected only at the local end of a single-circuit. The apparent impedance calculated by the distance relay is influenced by the combined reactance effect of the fault resistance and the load current as well as the mutual coupling effect caused by the zero-sequence current of the adjacent parallel circuit.

1. 서 론

전력시스템이 대용량화·초고압화됨에 따라 송전계통의 고장은 계통전반에 막대한 파급효과를 미쳐 안정적인 전력공급에 커다란 장애요인이 되고 있다. 더욱이 전력산업 구조의 개편으로 인한 전력거래 도입에 따라 계통의 신뢰도 문제가 보다 중요하게 되었으며 계통은 점차 병행 2 회선(Parallel Transmission Line)으로 구성되고 있어 이에 따른 보다 신뢰성 있는 보호가 요구되고 있다. 고장점 표정기(fault locator : FL)는 송전선에 고장이 발생했을 때, 고장 지점을 정확히 찾아 주어 보수 작업을 줄여 주고 고장으로부터 시스템을 빨리 회복시켜 주는 역할을 한다. 특히, 가공선로(overhead T/L)에서 고장점 표정은 고장이 일차 보호영역(first zone)의 끝부분에서 발생했을 경우와 고장직후의 조사와 보수를 수월하게 하기 위해서는 높은 정확성이 요구된다.

한편, 고장점 표정시 양단의 데이터를 이용하면 표정의 정확성이 증가하나 보호 계전기는 편단의 전압 전류 데이터를 이용하는 것이 훨씬 실용적이므로 일반적으로 편단의 데이터를 이용한다. 이때, 고장 발생시 거리를 계산하는데 있어서 부하 조류와 고장저항 그리고 상호 임피던스는 실제 고장점을 구하는데 매우 까다로운 요소로 작용한다[2,3]. 지금까지의 연구된 고장점 표정의 방법 중에서 고장 저항요소를 포함한 채 대칭성분의 비를 이용하여 거리를 계산하는 기법이 사용되어 왔으나, 고장 저항으로 인해 표정의 심각한 에러가 발생되어 최근에는 이러한 문제점을 해결해주는 즉, 고장 저항에 무관하게 고장 발생 위치를 계산하는 알고리즘이 제시되고 있다[4,5,6]. 송전선 보호를 위한 기법 중 거리계전기법은 고장시 계전기에서 측정되는 고장 전압과 전류신호로부터 임피던스를 계산하여 고장점까지의 거리를 추정하는 기법으로 송전선 보호에 널리 적용되는 기법이다. 정확한 고장 임피던스를 계산하기 위해서는 고장전압과 전류신호로부터 원하는 정보를 정확하게 추출하여야 한다. 거리 계전기법에 많이 적용되고 있는 이산 푸리에 변환(DFT)은 시간영역의 신호를 주파수 영역으로 변화하여 사용하는 기법으로 결과는 비교적 우수하지만 수렴시간이 다소 길다는 단점이 있다[7]. 신호의 변환과정 없이 시간영역에서의 연산을 위해 선로를 저항과 리액턴스의 집중된 회로로 근사화하여 미분방정식으로

표현하고 이로부터 고장점까지의 임피던스를 추정하는 기법도 제시되었다[8]. 본 논문에서는 병행 2회선 송전선에서 발생할 수 있는 지락고장과 단락고장에 대해 고장점을 추정하는 새로운 거리계전기법 즉, 고장점 추정속도를 향상시키기 위한 임피던스 계산방정식을 모두 미분방정식으로 표현하고, 비정현·비선형인 선로 파라미터의 실제값과 추정값의 오차를 최소화한 후 원하는 값을 추정하는 최소자승법(Least Square Error Method)[8]을 응용하여 최소자승법의 연산부담을 줄이고 고장점 추정시간을 최소화하는 순환형 최소자승법(Recursive Least Square Error Method)을 제시하였다. 계전기의 입력으로 사용되는 신호인 전압과 전류신호를 저역통과 필터와 직류오프셋 필터를 통하여 기본주파수 성분을 추출하였으며 지락고장시 발생할 수 있는 건전회선의 영상분 전류를 고려하였다. 제안된 기법의 우수성을 입증하기 위해 사용된 사례연구용 데이터들은 전자과도해석 프로그램인 EMTP(Electro-magnetic Transients Program)에 의하여 양전원 병행 2회선 전력계통으로 모의된 것이며, 고장조건에 대해 유연성을 가지고 모의하여 결과를 정리하였다.

2. 종래의 고장점 표정 알고리즘

2.1 고장 저항 제거에 의한 고장점 표정 알고리즘

고장이 발생한 지점을 정확하게 측정하는 것은 신속한 사후 복구 등, 전력계통의 신뢰성 있는 운용을 위해서 중요한 문제이며, 또한 고장이 발생한 이후의 과도해석에도 매우 중대한 영향을 미친다.

기존의 아날로그 방식에서는 고장 발생 지점을 측정하기 위하여 계전기와는 별도로 구성된 장치를 이용하고 있으며, 측정되는 리액턴스에 의해서만 고장 발생 거리를 추정하기 때문에 고장 저항 또는 부하 조류등과 같은 여러 계통 변화 요인들에 의하여 적절하게 대처하지 못하는 문제점이 있다. 일반적으로 계통의 수많은 변화 요인 중 고장 발생 지점을 정확하게 측정하는데, 결정적인 요인이 되는 것은 고장 발생 지점에 삽입되는 고장 저항 및 보호 선로 양단의 전원임피던스의 크기와 위상이다. 한편, 고장 발생 전의 부하전류(유입 또는 유출) 및 실계통에서 발생하는 여러 상황이 고려되면 정확한 고장 발생 지점의 측정은 더욱 복잡해진다.

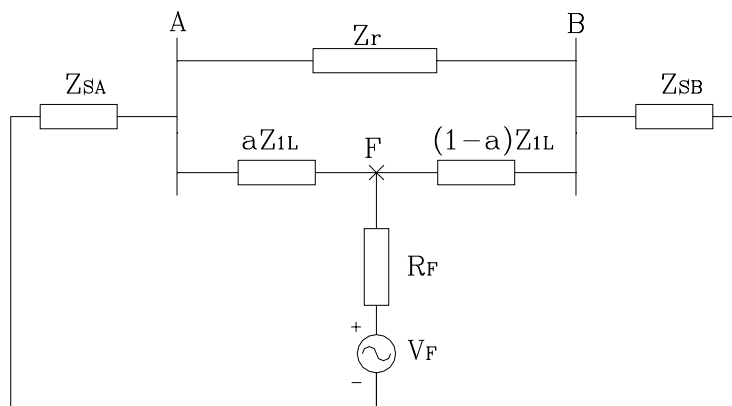


그림 1. 고장 등가 회로도

Fig. 1 Single-phase to ground fault

계통에 고장이 발생하였을 때, 계전기가 측정하는 전압, 전류는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned}
V_A &= I_A \alpha Z_L + \left(\frac{I_{FA}}{D_A} \right) R_F \\
&= I_A \alpha Z_L + \frac{I_{FA} R_F}{\frac{Z_{SB} Z_T + (1-\alpha) Z_L (Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T)}{(Z_{SA} + Z_{SB}) Z_T + Z_L (Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T)}}
\end{aligned} \tag{1}$$

위의 식에서

$$\begin{aligned}
Z_L (Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T) &= S_1 \\
Z_T Z_{SB} &= S_2 \\
(Z_{SA} + Z_{SB}) Z_T &= S_3
\end{aligned} \tag{2}$$

D_A 는 고장 분배 계수로서 전달 임피던스 Z_T 를 고려하면,

$$\begin{aligned}
D_A &= \frac{I_{FA}}{I_F} \\
&= \frac{(1-\alpha) Z_L + \frac{Z_T Z_{SB}}{Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T}}{\alpha Z_L + \frac{Z_T Z_{SA}}{Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T} + (1-\alpha) Z_L + \frac{Z_T Z_{SB}}{Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T}} \\
&= \frac{Z_{SB} Z_T + (1-\alpha) Z_L (Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T)}{(Z_{SA} + Z_{SB}) Z_T + Z_L (Z_{SA} + Z_{SB} + Z_T)}
\end{aligned} \tag{3}$$

와 같다.

$$V_A = \frac{I_A \alpha Z_L \{S_2 + (1-\alpha) S_1\} + I_{FA} (S_3 + S_1) R_F}{S_2 + (1-\alpha) S_1} \tag{4}$$

$$\alpha^2 - K_1 \alpha + (K_2 - K_3 R_F) = 0$$

여기서,

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{1 + S_2}{S_1} + \frac{V_A}{I_A Z_L} \\
K_2 &= \frac{V_A}{I_A} \left(\frac{1}{Z_L} + \frac{S_2}{Z_L S_1} \right) \\
K_3 &= \frac{I_{FA}}{I_A} \left(\frac{1}{Z_L} + \frac{S_3}{Z_L S_1} \right)
\end{aligned} \tag{5}$$

이 된다.

위의 식에서 계수 K_1, K_2, K_3 는 계진기가 측정하는 기지의 값이고, 미지의 변수는 고장이 발생한 위치 a 와 고장 저항 R_F 이다.

한편, 위의 계수 K_1, K_2, K_3 는 복소값(complex value)을 가지므로,

$$K_1 = a_1 + jb_1, \quad K_2 = a_2 + jb_2, \quad K_3 = a_3 + jb_3 \quad (6)$$

라 놓으면,

위의 식은 다음과 같은 실수성분 및 허수성분의 두가지 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} a^2 - a(a_1 + jb_1) + (a_2 + jb_2) - (a_3 + jb_3)R_F &= 0 \\ -b_1a + (b_2 - b_3)R_F &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

위의 두 식을 정리하면 결국,

$$a^2 - \left(a_1 - \frac{a_3}{b_1}\right)a + \left(a_2 - \frac{a_3}{b_3}b_2\right) = 0 \quad (8)$$

이 되어 고장이 발생한 지점에 삽입되는 고장 저항 R_F 에 관계없이 위의 2차 방정식의 해를 구함으로써 정확한 고장 위치를 측정할 수 있다.

2.2 대칭 성분에 의한 고장점 표정 알고리즘

3상 전력 계통에서 전압 전류의 대칭 성분만을 사용하여 고장 형태별 고장 거리를 계산한다. 기본적으로 양 전원 1회선 송전선로의 모델 계통에서 유도하면 다음과 같다.

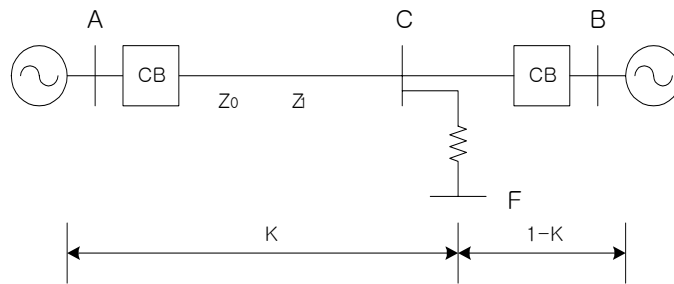


그림 2. 1회선 1선지락고장

Fig. 2 Single line-to-ground fault

대칭 성분에 대한 전압 방정식은 식(9)와 같이 된다.

$$E_{0F} = E_0 - KI_0Z_0 - R_{0F}I_{0F}$$

$$E_{1F} = E_1 - KI_1Z_1 - R_{1F}I_{1F}$$

$$E_{2F} = E_2 - KI_2Z_2 - R_{2F}I_{2F}$$

(9)

각 성분에 대한 비를 식(10)과 같이 정의한다.

$$E_{0F} = I_0Z_0(K_0 - K) - R_{0F}I_{0F}$$

$$E_{1F} = I_1Z_1(K_1 - K) - R_{1F}I_{1F}$$

$$E_{2F} = I_2Z_2(K_2 - K) - R_{2F}I_{2F}$$

(10)

3상 고장시 대칭 성분은 정상분만이 존재하게 되며 모선 F의 전압은 0이 되고, 선간단락 고장시 대칭 성분은 정상성분과 역상분만이 존재하게 되고, 1선 지락시 대칭 성분은 역상분, 정상분, 영상분이 모두 존재하게 된다. 한편, 2선 지락고장시 영상분, 역상분, 정상분 전압은 모두 같게 된다. 각 고장에 따른 경계조건을 고려하여 고장거리 방정식을 구하면 된다.

2.3 잉여 전류 보상에 의한 거리 계산알고리즘

지락사고 시 대지 귀로를 흐르는 영상전류의 강하에 따른 계전기의 언더리치(under reach) 현상이 일어나게 된다. 즉, 거리상으로는 계전기의 동작 범위 내의 사고인데도 계전기가 부동작하는 현상이 나타난다. 따라서 영상전류에 의한 불평형 상태에서 계전기의 부동작을 막기 위해 잉여전류를 보상하는 임피던스 연산 방법이 필요하다.

2.3.1 1회선 송전선의 지락고장

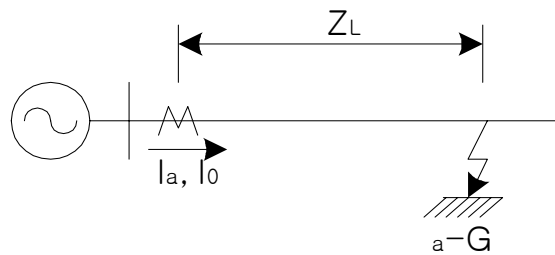


그림 3. 1회선 송전선의 지락고장
Fig. 3 Single line-to-ground fault

$$V_a = Z_L(I_a + 3K_N I_0) \tag{11}$$

여기서, $K_N = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ (잉여분 보상계수)

2.3.2 2회선 송전선로 지락고장

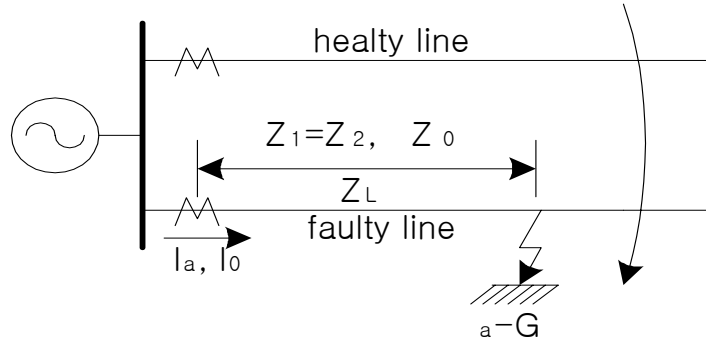


그림 4. 2회선 송전선로에서의 지락고장
Fig. 4 Double line-to-ground fault

그림 5와 같은 2회선 송전선의 경우 계전기가 측정한 임피던스 전압은 다음과 같이 표현되어진다.

$$V_a = Z_L(I_a + K_N \cdot 3I_0 + K_M 3I'_0) \quad (12)$$

여기서, $K_N = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$: 잉여분 보상계수

$$K_M = \frac{Z_M}{3Z_1} \quad : \text{상호전류 보상계수}$$

이상과 같이 대상 송전선의 선로정수로부터 결정되는 상수 값으로서 각각 $3I_0$ 와 $3I'_0$ 를 이용하여 간단히 고장점까지의 임피던스를 구할 수 있다.

2.4 전류분배 계수를 이용한 고장점 표정 알고리즘

그림 5의 A에서 측정되는 복소 임피던스는 다음과 같이 표현이 된다.

$$Z_A = V_A/I_A = Z_{LA} + (I_F/I_A)R_F \quad (13)$$

총 고장전류 I_F 는 그림 5(c)에서의 I_{FA} 와 그림 5(b)에서의 부하전류 I_L 로의 순수한 고장 전류로 구성이 된다.

$$I_A = I_{FA} + I_L \quad (14)$$

순수 고장 전류 I_{FA} 는 전류 I_F 의 일부이다.

$$I_{FA} = D_A I_F \quad (15)$$

여기서, $D_A = de^{j\gamma}$ (순수 복소 고장 전류 분포 요소)

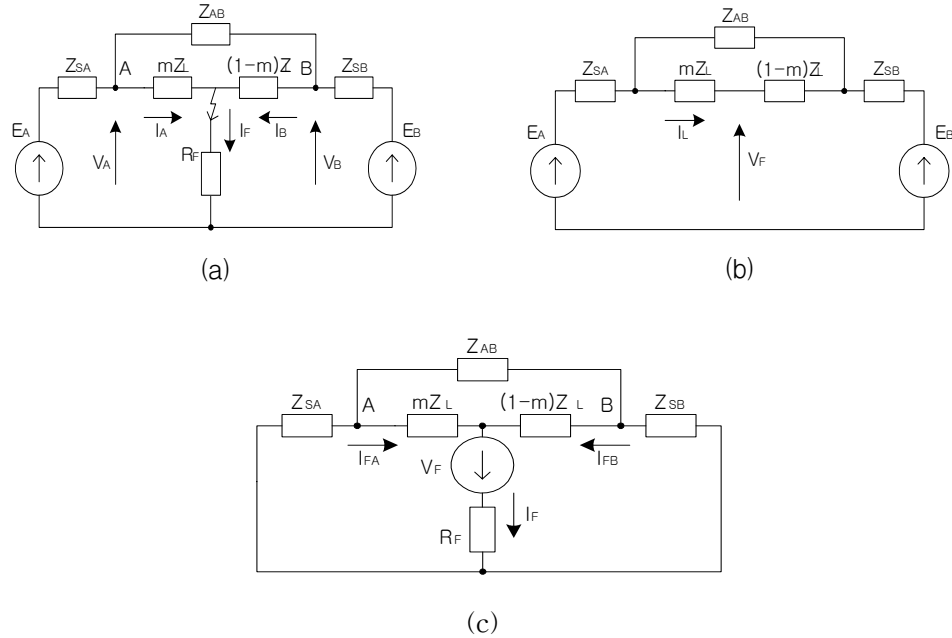


그림 5. 고장 계통 분해도

Fig. 5 Decomposition of the faulted system.

분배계수 D_A 는 전압 E_A 와 E_B 의 크기와 위상에 의존하지 않고 계통의 구성에만 의존한다. 이와 같은 기법을 이용한 고장점 표정알고리즘은 기존의 고장점 위치를 정확히 계산하는데 있어서 까다로운 요소로 작용했던 고장 저항 R_F 의 크기에 전혀 무관하게 고장점을 계산할 수가 있다.

3. 고장점 추정 알고리즘

3.1 최소자승법을 이용한 고장점 추정 알고리즘

최소자승법은 주어진 방정식의 개수가 미지수의 개수보다 많아 정확한 해를 구할 수 없는 경우, 추정해와 실제 해의 오차를 최소화하여 가장 근사적인 해를 추정하는 기법이다. 이를 적용하기 위해 1선 지락고장의 경우 고장회선을 1차 미분방정식 형태로 표현하면 다음 식(16)과 같다[4].

$$V_a = R_1(I_a + K_r I_0 + K_{rm} I_{m0}) + L_1 \left(\frac{dI_a}{dt} + K_l \frac{dI_0}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{m0}}{dt} \right) + 3R_f I_0 \quad (16)$$

여기서, $K_r = (R_0 - R_1)/R_1$, $K_{rm} = R_{m0}/R_1$, $K_l = (L_0 - L_1)/L_1$, $K_{lm} = L_{m0}/L_1$ 이며,

1선 지락고장의 경우 $R_f = 0$ 이라고 하면 미지항은 R_1 , L_1 이 된다.

식(16)을 미지항과 기지항의 행렬로 분리하고 k 번째 시점의 식으로 표현하면 식(17)과 같다.

$$V(k) = A(k) \cdot x(k) = [a_1(k) \ a_2(k) \ a_3(k)] \cdot x(k) \quad (17)$$

여기서, $V(k) = V_a(k)$

$$x(k) = [R_1(k) \ L_1(k) \ R_f(k)]^T$$

$$a_1(k) = I_a(k) + K_r I_0(k) + K_{rm} I_{m0}(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_a(k)}{dt} + K_l \frac{dI_0(k)}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{m0}(k)}{dt}$$

$$a_3(k) = 3I_0(k)$$

의사 역행렬을 이용하여 식(17)를 미지행렬 $x(k)$ 의 추정치인 $\hat{x}(k)$ 에 대해 전개하면 식(18)과 같다.

$$\hat{x}(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (18)$$

식(18)에서 고장점까지의 저항성분과 리액턴스 성분을 추정하여 고장거리를 판단할 수 있다. 이와 같이 고장임피던스를 구하는 데에 최소자승법을 적용하면 시간영역에서의 직접적인 연산이 가능해지며, 추정을 위한 윈도우의 크기를 자유롭게 할 수 있어 보다 빠른 수렴값을 얻을 수 있다. 즉, 미지수의 개수가 3개이므로 최소 3개 이상의 연속된 데이터만 있으면 비교적 정확하게 수렴을 할 수는 있다. 그러나 계통의 고장 신호 특성상 너무 작은 수의 데이터를 이용하여 연산하는 경우에는 일시적으로 심각한 외란성분을 가진 신호를 입력으로 사용하게 되면 심각한 오차를 유발할 수 있어 최소한 반주기 이상의 샘플값을 이용하여 결과값을 추정하는 것이 보다 안정적이라고 할 수 있다. 하지만 이렇게 반주기 이상의 데이터를 가지고 연산하는 경우에는 연산량이 증가하게 되며 푸리에 변환에 비해 수렴속도가 향상되는 결과는 가져오지 못한다.

3.2 순환형 최소자승법을 이용한 고장점 추정 알고리즘

반주기 이상의 샘플 데이터를 이용한 최소자승법의 경우에는 결과의 정확성은 우수하나 높은 주파수로 샘플링하는 경우에는 연산량의 증가로 인해 계전기의 부담과 수렴속도의 성능이 저하될 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 데이터가 입력으로 들어오는 때에는 기존의 추정값을 이용하여 새로운 추정값을 내보내는 순환형 최소자승법을 적용하였다. 순환형 최소자승법은 기존의 추정값의 영향으로 일시적인 심각한 외란을 가진 입력 신호에 대해서도 안정적인 값을 내보내며 매 샘플입력마다 결과값을 추정하므로 연산량을 현저히 감소시켜 고속의 수렴성능을 보여준다.

순환형 최소자승법의 k 번째 방정식의 최소자승법 결과를 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{x}(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (19)$$

$(k+1)$ 번째의 방정식을 이용한 최소자승법의 결과는 식 (20)과 같다.

$$\hat{x}(k+1) = (A(k+1)^T \cdot A(k+1))^{-1} \cdot A(k+1)^T \cdot V(k+1) \quad (20)$$

여기서,

$$A(k+1) = \begin{bmatrix} A(k) \\ a(k+1)^T \end{bmatrix}, \quad V(k+1) = \begin{bmatrix} V(k) \\ v(k+1) \end{bmatrix}$$

위 식에서 역행렬의 예비정리를 위해,

$$p(k) = [A(k)^T \cdot A(k)]^{-1},$$

$$p(k+1) = [A(k+1)^T \cdot A(k+1)]^{-1}$$

이라고 가정할 후 $p(k+1)$ 에 대해 전개하면,

$$p(k+1) = p(k) - \frac{p(k) a(k+1) a(k+1)^T p(k)}{1 + a(k+1)^T p(k) a(k+1)} \quad (21)$$

식(21)에서

$$\delta(k+1) = 1 + a(k+1)^T p(k) a(k+1)$$

$$g(k+1) = p(k) a(k+1) \delta^{-1}(k+1)$$

라고 치환하고 $p(k+1)$ 을 다시 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$p(k+1) = [I - g(k+1) a(k+1)^T] p(k) \quad (22)$$

식(22)에서 알 수 있듯이 $(k+1)$ 개의 방정식을 이용한 최소자승법을 k 개의 방정식을 이용한 최소자승법으로 전개하면 식 (23)이 된다.

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + g(k+1) \cdot [V(k+1) - a(k+1)^T \hat{x}(k)] \quad (23)$$

여기서, $\hat{x}(k) = p(k) A(k)^T u(k)$

$$g(k+1) = p(k) a(k+1) - g(k+1) a(k+1)^T p(k) a(k+1)$$

위의 식(23)을 이용함으로써 매 샘플마다 결과값을 추정할 수 있게 되므로 기존의 방법에 비해 연산부담이 줄어든다. 그리고 순환형 최소자승법은 이전의 추정값이 새로운 샘플값에 영향을 주어 심한 외란이 있는 샘플에 대해서도 안정한 값을 얻을 수 있는 장점이 있다.

4. 사례연구

4.1 모델계통

송전선로의 모델계통은 선간전압 154[kV]의 양전원을 가지며 선로의 전체 길이(공장)가 80 [km]인 선로로, 전체 선로의 구성은 그림 6에, 그리고 전원과 선로의 데이터는 표 1에 각각 나타내었다. 샘플링 주파수는 3840[Hz]로 한 주기당 64샘플을 한 것이며, P모선의 전압원인 V_p 를 기준으로 하여 고장 발생각이 0° 인 고장은 176샘플 지점에서, 90° 고장은 192샘플 지점에서 발생하도록 하였다. 이렇게 추출한 고장데이터를 MATLAB프로그램으로 구현된 거리계전기법에 적용하여 고장점 추정의 성능을 평가하였다.

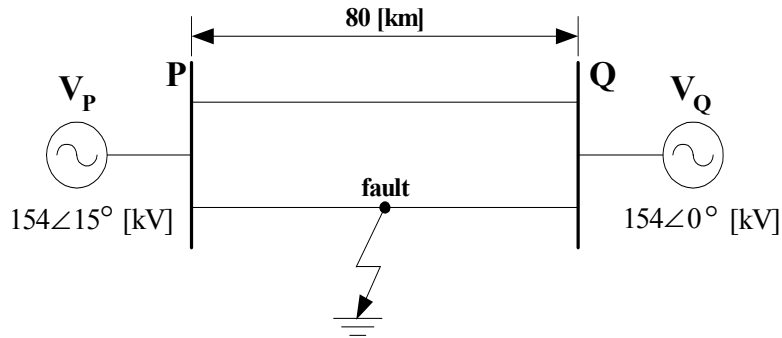


그림 6. 송전선 모델 계통

Fig. 6 Model system

표 1 모의 계통의 입력데이터

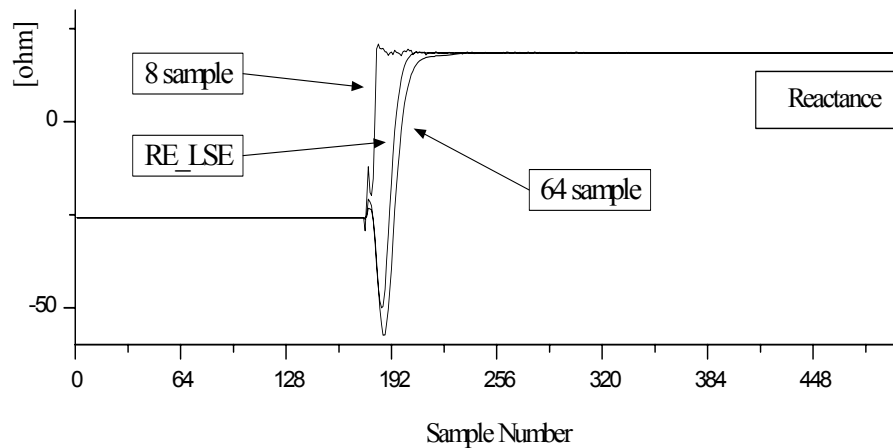
Table 1 Line Constant

		R	L	$C[\mu F/km]$	
전원 임피던스 [Ω]	P	Z_{P0} (영상분)	1.8699	10.089	-
		Z_{P1} (정상분)	0.5331	4.1106	-
	Q	Z_{Q0} (영상분)	2.3581	11.611	-
		Z_{Q1} (정상분)	0.5926	4.9773	-
선로 임피던스 [Ω/km]	Z_{L0} (영상분)		0.3088	0.3094	0.0038
	Z_{L1} (정상분)		0.1006	0.4667	0.0093
	Z_{m0} (상호 영상분)		0.2082	0.6961	0.0074

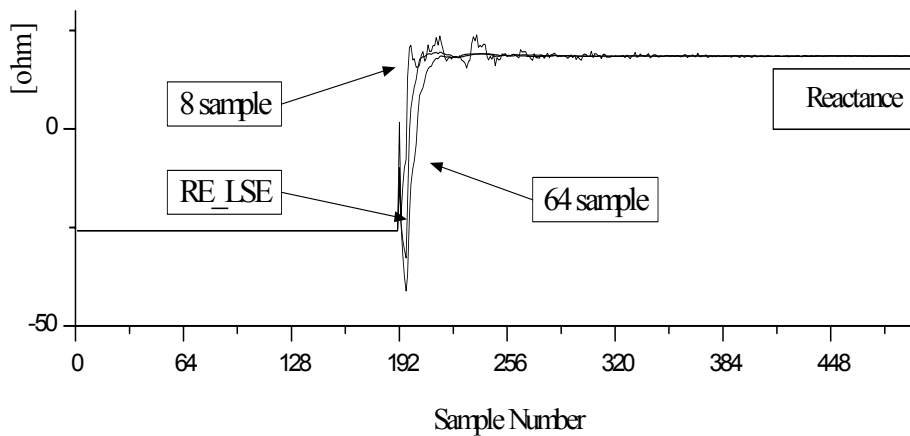
4.2 고장점 추정결과

그림 7은 최소자승법과 순환형 최소자승법의 수렴속도와 특성을 비교하기 위해 1선 지락고

장애 대한 리액턴스를 추정한 결과이다. 고장은 전체 송전선로의 50[%]지점에서 발생하였고 고장저항은 없는 것으로 가정하였으며, 수렴속도와 특성을 비교하기 위해 직류윅셋 성분이 많은 0[°]고장과 고조파 성분이 많은 90[°]고장에 대해 비교하였다. 고조파의 영향을 고려하기 위해 전처리 과정을 거치지 않은 고장신호를 그대로 입력으로 사용하였으며 최소자승법의 데이터 윈도우의 크기는 8샘플(1/8주기)과 64샘플(1주기)로 선정하여 결과를 비교하였다. 고장 발생각이 0[°]일 때는 고조파의 영향이 비교적 작아 최소자승법의 8샘플 데이터 윈도우 경우에도 안정적으로 수렴하며 64샘플의 데이터 윈도우나 순환형 최소자승법의 경우에 비해 다소 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 하지만 90[°]고장일 때는 고조파의 영향이 심하여 수렴이 안정적이지 않으며 이에 비하여 순환형 최소자승법을 사용한 경우에는 고조파에 상관없이 안정적으로 수렴하고 있다.



(a) 0[°]고장



(b) 90[°]고장

그림 7. 리액턴스 성분의 수렴속도 비교

Fig. 7 Results of measured reactance

4.3 에러율의 수렴시간 비교

에러율은 식(24)와 같이 설정하였으며, 기준이 되는 분모의 값을 전체 송전선로의 임피던스로 함으로써 고장거리에 관계없이 상대적인 평가를 가능하게 하였다.

$$error\ ratio = \frac{Z_{real} - Z_{estimate}}{Z_{total}} \times 100 \quad [\%] \quad (24)$$

에러율은 실제 임피던스의 1[%]와 5[%] 이내로 수렴하는 시점을 비교하여 그 샘플수로 표기 하였으며, 아래의 표 2에 그 값을 나타내었다.

표 2 에러율의 수렴시간 비교
Table 2 Simulated conditions & estimation results

단위 : 고장 후 샘플수

		5[%]	1[%]
8 Sample	0[°]	31	65
	90[°]	33	69
64 Sample	0[°]	69	89
	90[°]	75	90
RLSE	0[°]	56	70
	90[°]	62	72

순환형 최소자승법의 경우를 살펴보면 5[%] 이내로 수렴하는 데에 걸리는 시간은 한 주기 이내로 8샘플을 사용하는 경우보다는 다소 길게 나타나지만 5[%]에서 1[%]로 수렴하는 시간을 살펴보면 8샘플의 경우와 비교하여 수렴시간이 매우 짧은 것을 알 수 있다. 즉, 0[°]지락 고장 시 8샘플을 사용하는 때에는 5[%]에서 1[%]내로 수렴하는데 걸리는 시간은 34샘플이지만 순환형 최소자승법을 사용할 때에는 14샘플로서 빠르게 수렴하는 것이다. 이것은 순환형 최소자승법의 이전의 추정값이 새로운 추정값에 영향을 미침으로써 나타난 결과이다. 따라서 순환형 최소자승법을 이용하여 미분방정식의 해를 구하는 기법에서는 미리 전처리 과정을 거치는 것이 보다 신속한 고장점 추정을 가능하게 한다는 것을 알 수 있다.

4.4 고장조건 변화에 따른 결과

병행 2회선 송전계통에서는 상호회선간의 영상분 상호결합에 의한 영향으로 지락고장에 대한 고장점 추정에 에러를 일으킬 수도 있다. 따라서 고장회선의 고장점 추정시에 건전회선의 영상분 전류를 이용하여 영상분 상호결합을 보상해 주어 고장점 추정시 발생할 수 있는 에러를 최소화하여야 한다.

본 논문에서 모델링한 송전선로의 길이를 고장 임피던스로 변환하면 선로의 1[%]에 해당하는 거리는 0.3819[Ω]이다. 각 고장거리에 따른 정확한 계산결과는 표 3에 나타내었으며, 고장 거리에 관계없이 정확한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다.

표 3 고장거리에 대한 고장 임피던스 추정결과

Table 3 Simulated conditions & estimation results

고장거리[%]	실제임피던스[Ω]	추정임피던스[Ω]
10[%]	3.82	3.8545
30[%]	11.46	11.4543
50[%]	19.095	18.9217
70[%]	26.733	26.0448

표 4는 지락고장 시, 고장발생각의 변화에 따른 저항 성분과 리액턴스 성분의 추정값, 그리고 고장점 추정결과의 에러를 비교한 것이다. 고장발생각은 0°부터 90°까지 증가되며, 고장거리는 전체 선로의 50%지점에서 발생하였고 고장저항은 0[Ω]으로 가정하였다.

0°고장의 경우에는 직류옴셋 성분이 가장 크게 발생하며 90°고장에서는 고조파 성분이 큰 영향을 미친다. 하지만 순환형 최소자승법을 이용하는 기법에서는 직류옴셋 성분에 크게 영향을 받지 않으며 고조파 성분에 대해서는 전처리 과정을 거침으로써 정확한 값을 얻을 수 있다.

표 4 고장발생각에 따른 임피던스(지락고장)

Table 4 Simulated conditions & estimation results

임피던스		각[°]				
		0	30	45	60	90
R[Ω]	실제값	4.024				
	추정값	4.0075	4.0071	4.0071	4.0075	4.0086
X[Ω]	실제값	18.668				
	추정값	18.492	18.493	18.492	18.492	18.495
에러 [%]		0.4585	0.4575	0.4606	0.4604	0.4512

지락고장의 경우 고장 발생각에 상관없이 0.5[%]이내의 정확한 수렴결과를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 최소자승법을 응용한 순환형 최소자승법을 이용하여 보다 빠르고 정확한 거리계전기법을 제시하였다. 최소자승법과는 다르게 이전의 추정값과 새로운 샘플을 데이터 윈도우로 사용하므로 심한 고조파가 발생하는 고장에 대해서도 안정하고 빠른 수렴 성능을 보였으며 전체 선로에 대한 임피던스 추정 에러율 0.5[%]이내의 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) A. Wiszniewski, "Accurate fault impedance locating algorithm", IEEE Proceedings. Vol. 130, Pt. C, No. 6, pp. 311-314, November 1983.
- (2) Toshihisa Funabashi et al., "Fault Locator Simulation Using Models Language", IEEE Catalogue

No. 98EX137, pp. 601-606, 1998.

- (3) T.Takagi, et al., "A New Algorithm Of An Accurate Fault Location For EHV/UHV Transmission Lines : Part I -Fourier Transformation Method", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1316-1323, March 1981.
- (4) G.D. Rockefeller et al, "An Accurate Fault Locator With Compensation For Apparent Reactance In The Fault Resistance Resulting From Remote-End Infeed", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-104, No. 2, February 1985.
- (5) Chih-Wen Liu et al., "An Adaptive Fault Locator System For Transmission Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol. 2, pp. 930-936, 1999.
- (6) P. G. McLaren, M. A. Redfern, "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", Proceedings of the IEE, Vol. 122, No. 11, pp. 1301-1305, 1975.
- (7) M. Akke, J. S. Thorp, "Improved Estimates from the Differential Equation Algorithm by Dedian Post-Filtering, Developments in Power System Protection, No. 434, pp. 235-238, 1997.
- (8) M. B. Djuric, "Time Domain Solution of Fault Distance Estimation and Arcing Fault Detection on Overhead Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp60-67, 1999
- (9) 강상희, 이승재 외, "전류 분배 계수를 사용하는 병행 2회선 송전선로 고장점 표정 알고리즘", 대한 전기학회 논문지, Vol. 50 No. 3 pp.146-152, 2001.