

## Estimation of Fault Location on Transmission Lines using Current Phasor

여 상 민<sup>†</sup> · 김 철 환<sup>\*</sup>  
(Sang-Min Yeo · Chul-Hwan Kim)

**Abstract** - Since most of the Extra High Voltage (EHV) transmission lines are untransposed and multi-circuits, errors are occurred inevitably because of the unbalanced impedances of the lines and so on. Therefore, a distance relaying algorithm applicable to the untransposed multi-circuits transmission lines needs to be developed. The proposed algorithm of fault location estimation in the paper uses the fundamental phasor to reduce the effects of the harmonics. This algorithm also analyzes the second-order difference of the phasor to calculate the traveling times of waves generated by faults. The traveling time of the waves generated by faults is derived from the second-order difference of the phasor. Finally, the distance from the relaying point to the faults is estimated using the traveling times. To analyze the performance of the algorithm, a power system with the EHV untransposed double-circuit transmission lines are modeled and simulated under various fault conditions such as several fault types, fault locations, fault inception angles and fault resistances. The results of the simulations show that the proposed algorithm has the capability to estimate the fault locations quickly and accurately.

**Key Words** : Current Phasor, Transmission Line, Fault Location, Estimation, Traveling Wave

### 1. 서 론

송전선로의 거리계전 보호 방식은 고장선로를 선택적으로 차단하기 위해 정확한 고장점을 추정하는 것이 필요하다. 고장점 추정 알고리즘에는 여러 가지가 있으나 1970년대 후반부터 연구되기 시작한 진행파를 이용한 고장점 추정 알고리즘은 송전선로에서 발생한 고장에 의해 나타나는 진행파를 검출하고 분석함을 통해 진행파의 진행 시간, 진행파의 속도 등을 계산하고, 이 결과를 이용하여 고장 검출 및 고장점 추정을 수행한다.

이러한 진행파를 이용한 보호계전 알고리즘에 대한 연구는 오래전부터 흥미로운 주제로 다루어졌다. 1978년 H. W. Dommel과 J. M. Michels은 진행파 과도 해석을 사용한 고 속도 계전 알고리즘을 처음으로 발표하였다. Dommel과 Michels은 매우 빠르고 정확한 고장 검출을 위하여 진행파를 사용하였으며, 진행파 이론에 기반한 판별식을 제시함으로써 진행파를 이용해 신속하고 정확하게 고장의 종류를 판별할 수 있음을 보였다[1]. 그 후 McLaren 등은 1985년, 1988년 발표한 논문들에서 계전기로부터 고장점으로서의 과도 신호의 진행 시간을 추정하는데 전진파와 후진파 사이의 상호 상관관계 (cross correlation)를 이용한 기법을 개발하였

다[2-4]. F. H. Magnago와 A. Abur는 1998년에 발표한 그들의 논문을 통해 진행파 신호에 웨이브렛 변환을 적용하는 방법을 새롭게 제시하였다 Magnago와 Abur의 연구 결과는 이후 발표된 진행파 기반 고장점 추정 연구의 근간이 되었다고 할 수 있다[5]. M. Silva, M. Oleskovicz, 그리고 D. V. Coury는 Magnago와 Abur의 연구결과를 기반으로 보다 구체적이고 간단하게 정식화한 알고리즘을 제시하였다[6]. 또한 A. Elhaffar와 M. Lehtonen은 전류 진행파를 기반으로 한 진행파 고장점 표정 기법을 발표하였다[7]. 최근에는 W. Dai, M. Fang과 L. Cui가 웨이브렛 이론과 양단에서의 진행파 신호 추출에 의한 고장점 추정 시스템을 제안하였다[8]. 국내에서도 Y. J. Kwon, S. H. Kang 등은 송전선로 고장시 발생하는 진행파와 상관계수를 이용한 고장점 추정 기법을 발표하였다[9].

그러나 2회선 이상의 다회선 송전선로, 특히 초고압 송전선로인 765kV 송전선로와 같은 경우에는 비연가로 건설되어 기존 연구에서 고려되었던 단상 또는 1회선 송전선로에 비해 임피던스 불평형이 심하며 이는 정확한 고장점 추정을 더욱 어렵게 만드는 원인이 된다. 따라서, 초고압 비연가 2회선 송전선로에서의 빠르고 정확한 고장 검출 및 고장점 추정 알고리즘의 개발이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 765kV 비연가 2회선 송전선로에서 고장이 발생할 경우 나타나는 진행파 신호를 분석한다. 이렇게 분석된 진행파 신호는 비연가, 다회선 송전선로를 대상으로 수행된 결과로 앞서 제시한 문제점들이 이미 고려되었다고 할 수 있다.

본 논문에서는 765kV 비연가 2회선 송전선로에 대한 진행파 분석을 통하여 고장점 추정 알고리즘을 구현하고 송전선로에서 발생하는 고장에 대하여 성능을 평가한다.

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 성균관대 정보통신공학부 박사과정  
E-mail : harc@chollian.net

<sup>\*</sup> 펠로우회원 : 성균관대 정보통신공학부 교수  
접수일자 : 2009년 8월 21일  
최종완료 : 2009년 9월 7일

※ 본 논문은 본 학회 2009년 하계학술대회 학술위원회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회 심사 후 본 논문에 게재 되었음.

## 2. 진행파와 송전선로 고장

### 2.1 진행파의 정의

실제의 가공선로에서는 한 단에 전원이 인가되면, 다른 단에는 약간의 지연 시간 후에 전원이 관측된다. 이것은 선로에 인가된 전원이 파(波)의 형태로 전달된 것임을 알 수 있으며, 이러한 진행파는 과도현상의 연구에 기본이 된다. 진행파는 분포정수의 사용을 통해서만 기술될 수 있다. 따라서 가공선로 및 지중선로 상의 파의 전파를 이해하기 위해서는 분포정수 선로 모델을 해석할 필요가 있다. 다음 그림 1은 미소길이 간격  $\Delta x$ 에 걸쳐 존재하는 직렬 임피던스와 병렬 어드미턴스를 포함하는 분포정수 송전선로의 구성요소 부분 (elemental section)을 나타낸 것이다. 선로의 전체 임피던스 및 어드미턴스는 각각  $Z$ 와  $Y$ 이다.

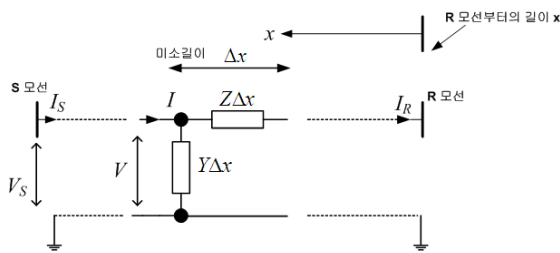


그림 1 분포정수 선로 모델의 구성요소 부분  
Fig. 1 Component of distributed line model

그림 1에서 단위길이  $\Delta x$ 에 대한 전압강하는 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있으며, 대지 (earth)로 분류되는 전류에 대한 식을 다음 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = -(R + L \frac{\partial i}{\partial t}) \Delta x \quad (1)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = -(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t}) \Delta x \quad (2)$$

이 식으로부터 파동 방정식을 유도하여 풀면 전압과 전류에 대하여 다음 식 (3)~(4)와 같은 일반해를 구할 수 있다.

$$v(x,t) = f_1(x - \gamma t) + f_2(x + \gamma t) \quad (3)$$

$$i(x,t) = \sqrt{\frac{C}{L}} f_1(x - \gamma t) - \sqrt{\frac{C}{L}} f_2(x + \gamma t) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{Z_c} f_1(x - \gamma t) - \frac{1}{Z_c} f_2(x + \gamma t) \quad (\because Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}})$$

여기서,  $\gamma$ 와  $Z_c$ 는 다음 식 (5), 식 (6)과 같이 재정의할 수 있다.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{ZY}} : \text{전파속도} \quad (5)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} : \text{특성 임피던스} \quad (6)$$

일반적으로 가공선로에 대한 특성 임피던스는 400Ω~500Ω 이고, 케이블에 대한 특성 임피던스는 40Ω~50Ω 범위이다. 전파속도는 가공선로의 경우 진공에서의 빛의 속도와 동일한  $3 \times 10^8$  [m/s]이고, 케이블에서는 빛의 전파속도의 1/3 ~ 1/2 정도이다.

식 (3)으로부터 해는 시간 및 거리 변수 모두를 갖는 함수  $V_i (= f_1(x - \gamma t))$ 와  $V_r (= f_2(x + \gamma t))$ 을 포함한다. 여기서  $V_i$ 와  $V_r$ 은 선로 상에서 진행하는 입사파 (incident wave 또

는 전진파-forward wave)와 반사파 (reflected wave 또는 후진파-backward wave)를 나타내며, 입사파는  $x$ 가 증가하는 방향으로 진행하며, 반사파는  $x$ 가 감소하는 방향으로 진행한다.

### 2.2 고장에 의한 진행파

송전선로에서 고장이 발생하게 되면, 고장점으로부터 발생한 파동이 진행파의 형태로 선로 양단으로 전파된다. 다음 그림 2는 송전선로에서 전방 고장이 발생한 경우 발생한 파동이 전파하고 반사하는 것을 보이고 있다.

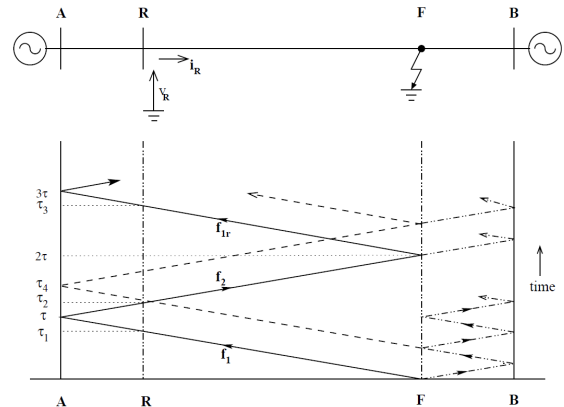


그림 2 전방 고장에 대한 진행파의 전파와 반사  
Fig. 2 Propagation and reflection of traveling wave in a forward fault

파동은 고장점 F와 모선 A, B에서 반사된다. 전압과 전류 신호는 모선 R에서 측정된다. 첫 번째의 후진파  $f_1$ 은  $\tau_1$ 의 시간에 R 지점에 도달한다. 그 후,  $\tau$ 의 시간에는 모선 A에 도달하게 된다. 모선 A에 도달한 진행파  $f_1$ 은 모선 A에서 반사된 후 R 지점을 거쳐 고장점으로 진행한다. 이 신호는 고장점에서 다시 반사하여  $\tau_3$ 의 시간에 R 지점을 다시 통과하고  $3\tau$ 의 시간에 모선 A에 다시 도달한다.

따라서 그림 2로부터 고장 거리는 모선 A로부터 고장점 F까지의 거리로 측정된다. 진행파의 전파속도를  $v$ 라고 할 때, 고장 거리는 진행파의 전파속도와 모선 A로부터 고장점 F까지의 진행 시간을 이용하여 계산할 수 있으며, 다음 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$d = \frac{v \times (3\tau - \tau)}{2} = \frac{v \times 2\tau}{2} = v \times \tau \quad (7)$$

또한, 모선 A와 R 사이의 거리는 일정하므로, 진행시간  $\tau_1$ 과  $\tau$ 의 시간 차이와  $\tau_3$ 와  $3\tau$ 의 시간 차이는 서로 동일함을 알 수 있다. 따라서, CT, PT와 같은 측정 설비가 없는 모선 A 지점에 대한 시간이 아닌 계전기 위치 R에서의 시간으로 식 (7)을 다시 쓰면 다음 식 (8)과 같다.

$$d = \frac{v \times (3\tau - \tau)}{2} = \frac{v \times (\tau_3 - \tau_1)}{2} \quad (8)$$

식 (7) 및 식 (8)은 기존 연구에서 사용되어온 고장에 의한 진행파로부터의 일반적인 고장점 추정 식이다.

본 논문에서는 고장점에서 발생한 진행파 신호를 보다 빠르고 정확하게 분석하기 위하여 고장점으로부터 반대측 모

선으로 진행되는 진행과를 고려하였다. 즉, 그림 2로부터 반대쪽으로 전파된 진행과를 보면 F점에서 시작된 진행과는 모선 B를 향하여 진행하다가 모선 B에서 반사하고, 고장점에서 반사, 투과하여  $\tau_4$ 의 시간에 모선 A에 도달함을 알 수 있다. 이때 모선 A와 고장점 F 사이의 선로와 모선 B와 고장점 F 사이의 선로는 동일한 선로이므로 전파속도는 동일함을 알 수 있고, 따라서, 모선 A에서의 최초 진행과 신호 도달 시점인  $\tau_4$ 과 모선 B에서 출발한 진행과가 모선 A에 도달한 시점인  $\tau_4$ 의 차이로부터 고장점 F로부터 모선 B까지의 고장거리를 다음 식 (9)와 같이 계산할 수 있음을 알 수 있으며, 식 (7)의 결과와 식 (8)의 결과가 동일함을 같이 식 (9)의 결과도 계산점에서의 측정 시간으로 계산될 수 있음을 또한 알 수 있다.

$$d_{F-B} = \frac{v \times (\tau_4 - \tau)}{2} \tag{9}$$

이때 유의할 점은 식 (7)과 식 (8)의 경우 전진과의 시간을 측정하는 것이기 때문에 시간  $\tau$ 와  $3\tau$ 에서의 진행과의 방향은 동일하며, 식 (9)에서의 시간  $\tau_4$ 에서의 진행과는 방향이 반대라는 점이다. 또한, 실제 계산하고자 하는 고장 거리는 모선 A와 고장점 F 사이의 거리로써 이는 전체 선로 거리로부터 고장점 이후 부분인 모선 B와 고장점 F 사이의 거리 만큼을 감하여 계산할 수 있으며 다음 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$d = l - d_{F-B} = l - \frac{v \times (\tau_4 - \tau)}{2} \tag{10}$$

### 3. 고장점 추정 알고리즘

#### 3.1 2차 차분

앞서 언급한 바와 같이 고장에 의해 발생한 진행과를 분석함으로써 전압과 전류가 변화하는 시점을 파악하고, 전진과, 후진과를 구분함으로써 고장의 방향과 고장 거리를 추정할 수 있다. 마찬가지로 전압 또는 전류가 증가하거나 감소하는지를 판단하기 위한 방법으로, 전압, 전류의 신호에 대한 현재 샘플과 다음 샘플 사이의 차인 1차 차분을 계산하여 샘플값의 변화량을 알아낼 수 있다. 다음 식 (11)은 전류 샘플  $I_n$ 에 대한 1차 차분 방정식을 나타낸 것으로, 임의의 순간의 샘플에 대한 이전 샘플의 차를 계산한다.

$$I_{1d,n} = I_n - I_{n-1} \tag{11}$$

또한 진행과에 따른 전압 또는 전류의 변화도 1차 차분을 통하여 변화하는 정도를 파악할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 전류 페이지의 신호 또한 고장 발생에 의한 진행과가 도달함에 의해 크기와 위상이 변하게 되는데, 전류 페이지에 대한 1차 차분을 계산하면 전류 페이지가 진행과 도달에 따라 언제 얼마나 변하는지를 알아낼 수 있다. 그러나 1차 차분에 의한 정보 만으로는 진행과의 도달 시점을 파악하기 위하여 2차 차분을 사용한다. 2차 차분은 1차 차분에 대하여 다시 차분을 계산하는 것으로, 2차 차분에 대한 결과를 보면 변화된 시점에서 상당한 크기의 첨두값이 나타남을 알 수 있다. 그러나 2차 차분의 크기 자체가 매우 작으므로 정상분 전류 페이지의 크기에 비해 작은 값으로 나타난다. 따라서, 용이한 크기 비교 및 데이터 추출을 위해

서는 2차 차분 값의 크기 조정이 필요하며, 크기 조정은 샘플링 간격 100배의 역수를 적용하면 충분히 큰 2차 차분 값으로 조정된다. 임의의 n 번째 샘플에 대하여 전류의 2차 차분 방정식은 다음 식 (12)와 같이 계산한다. 식 (12)에서 K는 scale factor ( $K=1/((\text{time step}) \times 100)$ )이다.

$$\begin{aligned} I_{2d,n} &= K \times (I_{1d,n} - I_{1d,n-1}) \\ &= K \times ((I_n - I_{n-1}) - (I_{n-1} - I_{n-2})) \\ &= K \times (I_n - 2I_{n-1} + I_{n-2}) \end{aligned} \tag{12}$$

#### 3.2 전류 페이지의 2차 차분을 이용한 고장점 추정 알고리즘

본 논문에서 제안하는 고장점 추정 알고리즘은 다음 그림 3과 같고, 흐름도에 기술한 기호들은 다음과 같다.

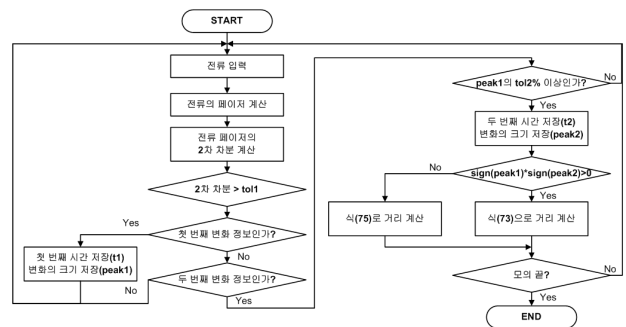


그림 3 고장점 추정 알고리즘

Fig. 3 Algorithm for estimation of fault location

- tol1 : 전류 페이지의 2차 차분을 위한 기준값
- tol2 : 두 번째 변화의 크기를 비교하기 위한 기준값으로 tol1에 대한 비율(%)
- t1 : 첫 번째 변화에 대한 시간
- t2 : 두 번째 변화에 대한 시간
- peak1 : 첫 번째 첨두값의 크기
- peak2 : 두 번째 첨두값의 크기

보다 빠른 시점을 검출하기 위하여 첨두값이 순차적으로 증가할 경우 최댓값을 추적하지 않고, 첨두값의 크기가 기준값 (tol1)보다 큰 것으로 확인된 첫 샘플에 대하여 첨두값 (peak1)으로 선정하고, 시점 (t1)을 측정하였다. 두 번째 첨두값의 시점을 계산하기 위하여 이후 샘플들에 대해서도 일정 크기 이상의 첨두값이 나타나고 있는지를 확인한다. 두 번째 첨두값의 경우에는 첫 번째 첨두값의 일정 비율 (tol2%) 이상의 크기를 가져야 하며, 이 조건을 만족할 경우 두 번째 첨두값 (peak2)으로 선정하고 시점 (t2)을 측정한다.

두 개의 첨두값을 검출하면 두 변화에 대한 시간을 사용하여 거리를 계산한다. 이때 두 번째 첨두값이 전진과에 의한 것인지, 후진과에 의한 것인지 판단하기 위하여 두 번의 변화에 대한 부호를 비교하며, 서로 같은 부호인 경우 (모두 (+) 또는 모두 (-))에는 동일한 방향의 신호이며 서로 부호가 다른 경우에는 한 번은 전진과이고 다른 한 번은 후진과임을 나타낸다. 따라서 동일한 방향의 신호인 경우 식 (7)~(8)을 사용하여 고장 거리를 추정하며, 서로 다른 방향의 신호인 경우에는 식 (10)을 사용하여 고장 거리를 계산한다.

### 4. 시뮬레이션 및 결과

#### 4.1 모의 계통

다음 그림 4는 본 논문의 고장점 추정 알고리즘을 모의하기 위한 국내 765kV 송전선로의 모델 계통이다. 137.4km 공장의 765kV 3상 2회선 송전선로로 구성되어 있으며 부하전류의 영향을 고려하기 위하여 양단 전원의 상차각을 10°로 적용하였다. 또한 양단 전원의 전원 임피던스는 다음 표 1의 데이터를 적용하였다[10].

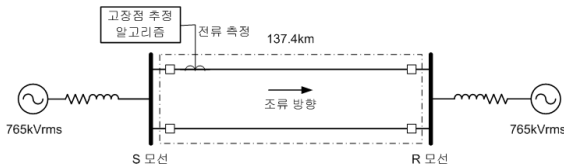


그림 4 765kV 초고압 비연가 송전선로 계통  
Fig. 4 EHV untransposed transmission system

표 1 전원 임피던스 (단위: Ω)  
Table 1 Source impedance (unit: Ω)

구분	S 모선	R 모선
정상분	0.7607925+j35.9328150	1.5801075+j42.487335
역상분	0.7607925+j35.7572475	1.5801075+j42.136200
영상분	3.2772600+j39.9708675	6.9056550+j62.560553

#### 4.2 모의 조건

본 논문에서는 기본 주파수 60Hz를 기준으로 주기당 2048 샘플링을 수행하였다. 해당 샘플링에 의하여 선정된 모의 시간간격은 약 8[us]이다. 본 논문에서는 고장점 추정 알고리즘의 구현 및 성능 검증을 위하여 다음 표 2의 고장 조건을 모의하고자 한다.

표 2 고장 조건  
Table 2 Fault conditions

고장 유형	1선지락, 2선지락, 선간단락, 3상
고장발생각	0°, 45°, 90°
고장거리	13.74km ~ 123.66km (전체 선로를 10% 단위로 분할하여 모의)

#### 4.3 모의 결과

##### 4.3.1 1선지락고장

다음 그림 5는 1선지락고장이 발생한 경우의 고장상 전류 파형이다. 90도 고장을 발생시킨 경우의 파형으로 전류에 DC offset 성분은 존재하지 않으며 고조파가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 다음 그림 6은 그림 5의 고장 전류에 대한 전류 페이저의 2차 차분이다. 그림 7에서 보인 바와 같이 고장 발생 이후 수차례 왕복 반사하는 진행파에 의해 일정 시간 간격으로 침두값이 나타나는 것을 알 수 있으며, 침두값이 나타나는 시점을 사용하여 고장 거리를 계산할 수 있다. 이 경우, 제안하는 알고리즘에서 추출된 첫 번째 침두값과 두 번째 침두값은 다음과 같다.

- t1 = 0.049892141592 sec, peak1 = 1531.269318 A
- t2 = 0.050075755578 sec, peak2 = 337.87493 A

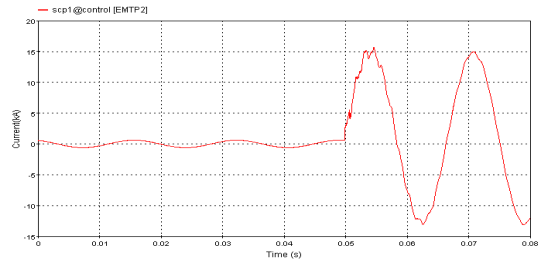


그림 5 1선지락고장에 대한 고장상에서의 순시전류 파형  
Fig. 5 Waveform of instantaneous current for single line-to-ground fault

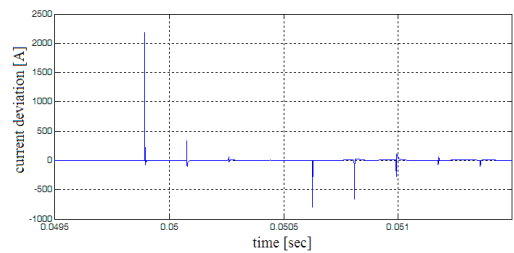


그림 6 1선지락 고장시 전류 페이저의 2차 차분  
Fig. 6 2nd-order difference of current phasor for single line-to-ground fault

peak1과 peak2의 부호가 동일하므로 식 (8)에 의해 고장 거리는 다음 식 (13)과 같이 계산될 수 있다. 전파속도  $v$ 는 빛의 속도  $3.0 \times 10^5 \text{ km/s}$ 로 가정하였다. 실제 고장 거리는 27.48km이며, 고장점 추정 결과의 오차율은 다음 식 (14)와 같이 계산된다.

$$d = \frac{v \times (\tau_3 - \tau_1)}{2} = \frac{3.0 \times 10^5 \times (0.050075755 - 0.049892141)}{2} \quad (13)$$

$$= \frac{3.0 \times 10^5 \times 0.000183614}{2} = 27.542098 \text{ km}$$

$$\text{오차율} = \frac{|(\text{실제 고장거리}) - (\text{추정된 고장거리})|}{(\text{총선로 길이})} \times 100\% \quad (14)$$

$$= \frac{|27.48 - 27.54|}{137.4} \times 100 = \frac{0.06}{137.4} \times 100 = 0.045\%$$

##### 4.3.2 2선지락고장

다음 그림 7은 전체 선로 길이의 40%인 54.96km 지점에서의 1회선의 고장시 고장발생각 45도의 2선지락고장에 대한 전류 페이저의 2차 차분 파형이다.

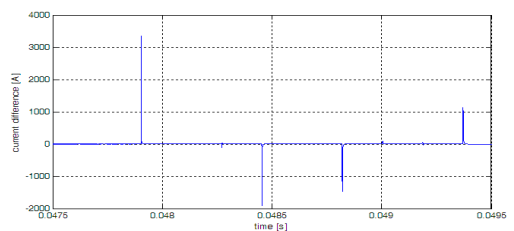


그림 7 2선지락고장에 대한 전류 페이저의 2차 차분  
Fig. 7 2nd-order difference of current phasor for double lines-to-ground fault

45도 고장의 경우 전류에 대부분 약간의 DC offset과 고조파가 포함되어 있으나 그림 8의 2차 차분 파형은 명확하게 진행과의 도달 정보를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 다음은 그림 8로부터 추출된 정보이다.

- t1 = 0.047903922558 sec, peak1 = 1757.177745 A
- t2 = 0.048453747264 sec, peak2 = -838.365398 A

peak1과 peak2가 서로 다른 부호를 가지므로 식 (10)에 의해 고장거리를 계산할 수 있으며, 전체 송전선로의 길이는 137.4km로 정해져있는 값이므로 식 (10)에 l=137.4을 대입하여 고장거리를 계산하면 다음 식 (15)를 얻을 수 있다. 실제 고장 거리에 대한 오차율은 다음 식 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$d = l - \frac{v \times (\tau_2 - \tau_1)}{2} = 137.4 - \frac{3.0 \times 10^5 \times (0.048453 - 0.047903)}{2} \quad (15)$$

$$= 137.4 - \frac{3.0 \times 10^5 \times 0.00055}{2} = 54.93 \text{ km}$$

$$\text{오차율} = \frac{|54.96 - 54.93|}{137.4} \times 100 = \frac{0.03}{137.4} \times 100 = 0.025 [\%] \quad (16)$$

### 4.3.3 선간단락고장

다음 그림 8은 전체 선로 길이 50%의 고장발생각 0도의 선간단락고장에 대한 전류 페이지의 2차 차분 파형이다.

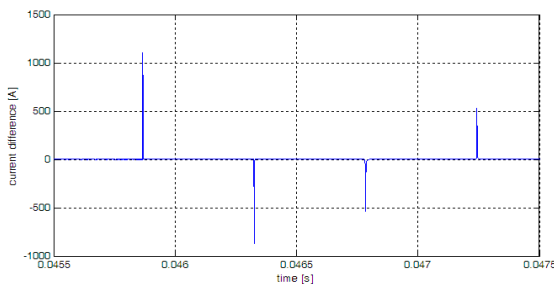


그림 8 선간단락고장에 대한 전류 페이지의 2차 차분  
Fig. 8 2nd-order difference of current phasor for line-to-line fault

그림 8의 선간단락고장에 대한 정보를 추출하면 다음과 같다.

- t1 = 0.04586687543 sec, peak1 = 483.968144 A
- t2 = 0.04632514745 sec, peak2 = -467.406905 A

peak1과 peak2가 서로 다른 부호를 가지므로 다음 식 (17)과 같이 계산된다. 실제 고장 거리는 68.7km이므로 오차율은 다음 식 (18)과 같이 계산된다.

$$d = 137.4 - \frac{3.0 \times 10^5 \times (0.04632515 - 0.045866875)}{2} = 68.659 \text{ km} \quad (17)$$

$$\text{오차율} = \frac{|68.7 - 68.659|}{137.4} \times 100 = 0.030 [\%] \quad (18)$$

### 4.3.4 3상고장

다음 그림 9는 전체 선로 길이의 10%인 13.74km 지점에서 1회선의 고장발생각 45도의 3상고장에 대한 전류 페이지의 2차 차분 파형이다.

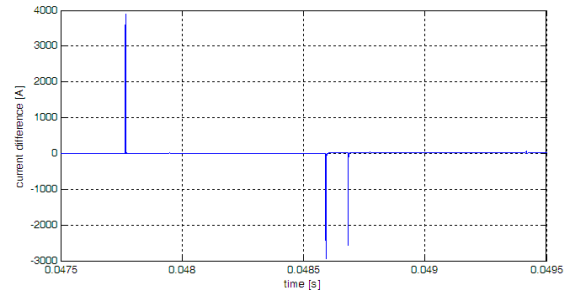


그림 9 3상고장에 대한 전류 페이지의 2차 차분  
Fig. 9 2nd-order difference of current phasor for three-phase fault

다음은 그림 9의 고장에 대하여 추출된 정보이다.

- t1 = 0.047766593538 sec, peak1 = 3323.241715 A
- t2 = 0.048591584910 sec, peak2 = -1911.393062 A

식 (10)에 의해 고장거리를 계산하면 다음 식 (19)와 같이 계산된다. 실제 고장 거리는 13.74km이므로 오차율은 다음 식 (20)과 같이 계산된다.

$$d = 137.4 - \frac{3.0 \times 10^5 \times (0.0485915849 - 0.0477665935)}{2} = 13.65 \text{ km} \quad (19)$$

$$\text{오차율} = \frac{|13.74 - 13.65|}{13.74} \times 100 = 0.065 [\%] \quad (20)$$

### 4.3.5 모의 결과 종합

다음 표 3은 표 2의 모의 고장 조건에 대한 고장점 추정 오차율을 정리한 것이다.

표 3 모의 결과

Table 3 Simulation results

고장유형	고장거리	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
		0도	0.065%	0.014%	0.019%	0.025%	0.030%	0.035%	0.040%	0.010%
1선지락	45도	0.065%	0.045%	0.096%	0.090%	0.030%	0.035%	0.015%	0.010%	0.005%
	90도	0.065%	0.045%	0.096%	0.090%	0.030%	0.035%	0.040%	0.010%	0.005%
	0도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
2선지락	45도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
	90도	0.065%	0.070%	0.075%	0.025%	0.030%	0.035%	0.015%	0.010%	0.050%
	0도	0.065%	0.014%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
선간단락	45도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
	90도	0.065%	0.070%	0.075%	0.025%	0.030%	0.035%	0.015%	0.010%	0.005%
	0도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
3상	45도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%
	90도	0.065%	0.070%	0.075%	0.025%	0.030%	0.035%	0.015%	0.010%	0.050%
	0도	0.065%	0.070%	0.019%	0.025%	0.030%	0.021%	0.015%	0.010%	0.005%

## 5. 결론

본 논문에서는 상기와 같은 문제점들을 해결함과 동시에 간단하면서도 빠른 출력을 얻을 수 있는 전류 페이지의 2차 차분을 이용한 고장점 추정 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 특징을 간략히 정리하면 다음과 같다.

첫째, 성능 검증을 위해 수행된 모의를 통해 제안하는 알고리즘은 매우 빠르고 정확한 고장점 추정을 수행하고 있음을 확인하였다. 제안하는 알고리즘의 출력 오차는 최대 0.120%로 실제 고장 거리와 추정 거리의 차이는 약 88m이다. 이러한 고장점 추정 결과는 기존 연구[1-10]에서의 최대 추정 오차 약 2~3%에 비하면 매우 정확한 결과라 할 수 있다.

둘째, 제안하는 알고리즘은 선로 양단이 아닌 자단의 정보만을 활용하여 고장점 추정 알고리즘을 수행함으로써 상대단의 정보를 받기 위한 통신 채널 및 GPS 시간 수신을 통한 시동기화 등의 보조 설비가 필요 없음을 알 수 있으며, 이는 실제 구현시 비용 절감의 측면으로 이어질 수 있다.

셋째, 상술한 바와 같이 계전점에 도달한 진행파가 전진파인지 후진파인지 판단하기 위하여 복잡하고 많은 연산이 요구되어왔다. 그러나 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 전류의 신호만을 사용함으로써 전압과 전류를 모두 사용하는 기존의 연구에 비하여 처리할 데이터 량을 반으로 감소시켰다. 또한 상대적으로 간단하고 단순한 방법을 사용하여 진행파의 특징을 추출하고, 추출된 신호의 부호만으로 정확하게 진행파의 종류를 판단할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 고장점 추정 알고리즘의 연구 결과를 토대로 송전선로에서 발생하는 고저항 지락고장과 측정시 발생할 수 있는 잡음에 대한 추가적인 연구를 수행할 것이다.

**감사의 글**

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

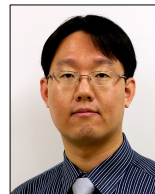
**참 고 문 헌**

[1] H. W. Dommel, J. M. Michels, "High speed relaying using traveling wave transient analysis," IEEE PES Winter Power Meeting, New York, no. 78 CH1295-5 PWR, paper no. A78 214-9, pp. 1-7, Jan. 1978.  
 [2] S. Wajendra, P. G. McLaren, "Traveling-wave techniques applied to the protection of teed circuits: principle of traveling wave techniques," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3544-3550, Dec. 1985.  
 [3] S. Rajendra, P. G. McLaren, "Traveling wave techniques applied to the protection of teed circuits: Multi-phase/multi circuit system," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3551-3557, Dec. 1985.  
 [4] E. H. Shehab-Eldin, P. G. McLaren, "Traveling wave distance protection- problem areas and solutions," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 894-902, July 1988.  
 [5] F. H. Magnago, A. Abur, "Fault location using wavelets," IEEE Transactions on Power Delivery,

vol. 13, no. 4, pp. 1475-1480, Oct. 1998.

[6] M. Silva, M. Oleskovicz, D. V. Coury, "A fault locator for transmission lines using traveling waves and wavelet transform theory," Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, vol. 1, pp. 212-215, 5-8 April 2004.  
 [7] A. Elhaffar, M. Lehtonen, "Travelling waves based earth fault location in 400 kV transmission network using single end measurement," Large Engineering systems Conference on Power Engineering, pp. 53-56, July 2004.  
 [8] W. Dai, M. Fang, L. Cui, "Traveling wave fault location system," World Congress on Intelligent Control and Automation, vol. 2, pp. 7449-7452, June 2006.  
 [9] Y. J. Kwon, S. H. Kang, D. G. Lee, H. K. Kim, "Fault location algorithm based on cross correlation method for HVDC cable lines," IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection 2008, pp. 360-364, 17-20 Mar. 2008.  
 [10] Y. J. Ahn, S. H. Kang, "A study on the transient characteristics in 765kV untransposed transmission systems," Transactions on KIEE, vol. 53A, no. 7, pp. 397-404, July 2004.

**저 자 소 개**



**여 상 민 (呂 相 敏)**

1976년 7월 21일생. 1999년 성균관대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공석). 2009년 동 대학원 정보통신공학부 박사과정  
 Tel : 031-290-7166  
 Fax : 031-290-7955  
 E-mail : harc@chollian.net



**김 철 환 (金 喆 煥)**

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장  
 Tel : 031-290-7124  
 Fax : 031-290-7179  
 E-mail : hmwkim@daum.net