

## A Fault Location Algorithm for a Transmission Line Using Travelling Waves

姜相熙<sup>†</sup> · 金眞漢<sup>\*</sup>  
(Sang-Hee Kang · Jin-Han Kim)

**Abstract** - The conventional fault location algorithms based on the travelling waves have an inherent problem. In cases of the close-up faults occurring near the relaying point and of the faults having zero degree inception angle of voltage signals, the conventional algorithms can not estimate an accurate fault distance. It is because the shapes of travelling waves are near sinusoidal in those cases. A new method solving this problem is presented in this paper. An FIR(Finite Impulse response) filter which makes high frequency components prominent and makes the power frequency component and dc-offset attenuated is used. With this method, the cross-correlation peak is to be very clear when a close-up fault or a fault having near zero-degree inception angle occurs. The cross-correlation peaks can be clearly distinguished and accurate fault location is practically possible consequently. A series of simulation studies using EMTP(Electromagnetic Transients Program) show that the proposed algorithm can calculate an accurate fault distance having maximum 2% or less error.

**Key Words** : Fault Location, Travelling Waves, FIR Filter, Cross Correlation

### 1. 서 론

송전선로에 고장이 발생했을 경우 고장 발생지점을 정확히 찾아내는 것은 계통을 안정적으로 유지하기 위한 신속한 고장복구에 필수적 요소이다. 만약 고장점 표정장치가 없다면 광범위한 송전선로 구간을 육안으로 확인하여야만 하며 많은 인력과 비용이 소모된다.

고장점 표정 알고리즘은 전파 방정식을 이용하는 방법 [1][2]과 전압과 전류의 기본파 성분을 사용하는 임피던스 법[3]등으로 구분하고 있다.

진행파를 이용한 방법은 고장시의 전압, 전류의 기본파뿐만 아니라, 고주파 성분까지 입력신호로 모델화 하는 방법이다. 이 방법은 단상 선로를 대상으로 Vitin[4]에 의해 최초로 연구되었다. 고장 거리는 계전기에 도달하는 전진파와 후진파의 시간차로 계산하였다. 양쪽단에서 기준값을 넘는 전진파와 후진파의 도착 순서로부터 고장 방향을 알아내는 방향 비교 저지 방식이 John[5]에 의해 제안되었다.

그뒤 McLaren과 Crossly[6]는 진행파의 전진파와 후진파의 시간차를 구하기 위하여 상호 상관 함수(cross-correlation)를 이용하였다.

지금까지 진행파를 이용한 거리 계산 방식이나 고장점 표정 방식이 해결하지 못한 문제는 크게 두 가지로 나눌 수

있다. 그 하나는 진행파의 전파시간이 매우 짧은 근접고장이 발생했을 때이고, 다른 하나는 전압 위상각 0° 및 그 근처의 고장은 감지하지 못한다는 것이다[7]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 상호 상관 함수(cross-correlation)출력의 실효값을 사용하는 방식[7]과 고장시의 전압 위상각을 보정인자(correction factor)로 계전 신호에 사용하는 방법[7]이 제안되었으나 근접 고장 및 전압 위상각 0° 근처의 고장은 전·후진파가 기본적으로 전력 주파수[60Hz] 성분과 같은 형태를 가지므로 상호 상관 함수(cross-correlation)에 필요한 전·후진파의 피크(peak) 부분이 두드러지지 않아 고장거리 판별이 역시 어렵다는 문제가 남게된다.

본 논문에서 dc-오프셋(offset) 제거 효과뿐만 아니라 고주파(high frequency)를 증폭해주는 효과가 있는 FIR 필터를 전압 위상각 판단 없이 전압, 전류신호 모두를 적용하여 결과적으로 상호 상관 함수의 피크를 보다 쉽게 구별하는 알고리즘을 제안한다. 이런 이유로 전력 주파수 성분만을 가지는 전압 위상각 0°고장 시에도 정확한 고장거리계산이 가능하다. 사례연구를 통하여 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 알고리즘과 비교하여 제안한 알고리즘이 고장저항 및 부하전류의 변화에도 영향을 받지 않음을 입증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 진행파의 개념

본 논문에서는 계통을 주파수에 의존하지 않는 무손실 분포정수 회로로 취급하여 2차 편미분 방정식으로 표시되는 파동 방정식을 사용하였다.[11][12]. D'Alembert해로 널리 알려진 파동방정식의 해는 식(1), (2)와 같다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博  
E-mail : ginani74@hanmail.net

<sup>\*</sup> 學生會員 : 明知大學 電氣工學科 碩士  
接受日字 : 2004年 6月 16日  
最終完了 : 200年 8月 11日

$$v(x, t) = Z_0 [ f_1(x-t/u) - f_2(x-t/u) ] \quad (1)$$

$$i(x, t) = f_1(t-x/u) + f_2(t+x/u) \quad (2)$$

여기서,  $u$  : 전파속도 ( $\sqrt{\frac{1}{LC}}$ )

$Z_0$  : 선로의 특성 임피던스( $\sqrt{\frac{L}{C}}$ )

식 (1), (2)에서  $f_1(x-t/u)$ 는  $x$ 의 양의 방향으로 진행하는 진행파(전진파)이고  $f_2(x+t/u)$ 는  $x$ 의 음의 방향으로 진행하는 진행파(후진파)이다.

따라서, 계전기 설치점의 전진파  $f_1$ 와 후진파  $f_2$ 는 식 (3), (4)과 같이 표시할 수 있다.

$$2 Z_0 f_1(t) = Z_0 i(t) + v(t) = S_1(t) \quad (3)$$

$$2 Z_0 f_2(t) = Z_0 i(t) - v(t) = S_2(t) \quad (4)$$

### 2.2 중첩 성분(Superimposed Component) 추출

송전 선로에서의 고장 발생은 고장지점에 정상상태 전압과 크기가 같고 부호가 다른 전압을 인가하는 것과 같다 [12]. 그러므로 고장 이후의 전압과 전류성분은 그림 2에서 보는 바와 같이 고장 이전의 정상상태 성분과 고장이후의 과도상태 성분의 합으로 볼 수 있고 식 (5), (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{post} = i_{pre} + i_s = i_{pre} + i_{steady-state} + i_{transient} \quad (5)$$

$$v_{post} = v_{pre} + v_s = v_{pre} + v_{steady-state} + v_{transient} \quad (6)$$

여기서,  $s$  : 중첩성분,  $post$  : 고장후 값,  $pre$  : 고장전 값

고장 발생과 더불어 발생하는 증가된 성분인  $i_s, v_s$ 는 고장에 관한 대부분의 정보를 포함하고 있기 때문에 매우 중요하다. 본 논문의 진행파를 이용한 고장점 표정 알고리즘에서는 전압, 전류 신호들의 이러한 증가된 성분만을 입력 신호로 사용한다. 이 증가된 성분은 고장 이후의 신호에서 고장전의 정상상태의 성분들의 차로서 구성되며, 진행파에 관한 기본적인 정보들을 가지고 있게 된다.

결국, 고장거리 계산을 위한 계전 신호로 사용되는 전압, 전류의 중첩성분  $s$ 는 식 (7), (8)과 같이 표현된다.

$$i_s = i_{post} - i_{pre} \quad (7)$$

$$v_s = v_{post} - v_{pre} \quad (8)$$

한편, 실제 구현 시에는 고장거리계산이 한 주기이내에 가능함으로 고장후 값은 현재의 입력값을, 그리고 고장전 값은 한 주기 전에 입력된 값을 한 주기 시지연 시킨 후 사용하면 된다.

### 2.3 Modal 변환

3상 송전 선로에서 전압과 전류를 D'Alembert 해로 표현하려면 3상 전압, 전류를 각각 3개의 단상 송전 선로로 표현할 수 있는 독립적인 전압과 전류로 나타내어야만 한다[12]. 3상 송전선로에서 진행파 정보를 포함하는 선로의 전압, 전류는 3개의 mode로 구성되어 있다. 각 mode는 각기 다른

전파속도와 감쇠정수 및 특성 임피던스를 가지므로 3상의 전압, 전류 신호는 3개의 독립적인 mode로 구분될 수 있다.

계통에 가장 적합한 고유벡터를 구하는 문제는 대표적으로 Clarke와 Wedepohl 등에 의해서 연구되어져 왔다. 본 논문에서는 Wedepohl이 정의한 고유벡터를 이용하였다. 식 (9)는 Wedepohl이 정의한 고유벡터를 나타내었고 변환행렬은 식 (10)과 같다.

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $[S] : [Z_p]$ 에 대한 고유 벡터

$[Q] : [Y_p]$ 에 대한 고유 벡터

3개의 a, b, c 상으로 구분되는 상전압은 단상 선로 3개가 있는 것처럼 3개의 독립적인 모드로 분해된다.

상전압과 상전류는 식 (11), (12)과 같은 관계가 있다.

$$[V_p] = [S][V_m] \quad (11)$$

$$[I_p] = [Q][I_m] \quad (12)$$

여기서,  $V_m$  : 전압 modal 벡터,  $I_m$  : 전류 modal 벡터

식 (13)는 이를 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, 첨자 0, 1, 2는 독립적인 모드

3개의 독립적인 모드 중 첫 번째 모드인 ground mode는 주파수 의존적이고 속도가 느린 특성을 가지고 있어 본 논문에서는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 aerial mode2를 사용하였고 전파속도는 296.47[km/msec]이고 1 point가 0.016[msec]이다.

### 2.4 상호 상관 함수(Cross correlation)

상호 상관 함수는 들어오는 파와 반사되는 파가 얼마나 correlate 되었는가, 즉 유사성의 정도를 알 수 있다. 상호 상관 함수는 샘플된 신호 X와 시지연  $\tau$ 후의 나타나는 신호 Y와의 유사성 정도를 나타낸다. 그 식은 (14)와 같고 그림 3에서 보여준다[7][9][10].

$$\phi_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M Y(k\Delta t + \tau) X(k\Delta t) \quad (14)$$

여기서,  $\Delta t$  : 샘플치 간격의 시간

M : 윈도우당 샘플수

신호 X가 순차적으로 들어오는 신호 Y에 나타나면 식 (14)의  $\tau=T$ 일 때 상호 상관 함수는 최대값을 가진다.

실제로 계전 신호로 사용되는 전진파(forward wave)와 후진파(backward wave)는 서로 다른 평균값을 가진다. 두 신호의 평균값이 다를 때 상호 상관 함수의 값을 왜곡시킨다. 이런 문제점을 해결하기 위해 서로 다른 두 신호  $S_1, S_2$ 의 평균치 값을 각각 빼주는 이산 상호 상관 함수(discrete cross-correlation)를 사용하였다. 이산 상호 상관 함수는 전진파  $S_1$ 과 후진파  $S_2$ 간의 시간지연  $\tau$ 의 함수로 나타나고 그 식은 (15)과 같다.

$$\phi_{S_1, S_2}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M [S_1(k\Delta t) - S_{1, S_2}^{AVR} - S_2(k\Delta t + \tau) - S_{2, S_1}^{AVR}] \quad (15)$$

여기서,  $S_1^{AVR} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_1(k\Delta t)$

$$S_2^{AVR} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_2(k\Delta t + \tau)$$

N : correlate되는 구간의 샘플수

실제 구현에서는 전진파와 후진파를 비교하게 되는데, 전진파는 이미 저장하고 있고 샘플링 시간 간격만큼 후에 순차적으로 들어오는 후진파와 상호 상관을 비교한다.

2.5 고장 거리의 계산

고장점까지의 거리를 계산하는 데는 관측점을 떠난 전진파가 얼마만큼의 시지연을 가지고 후진파로서 다시 관측점에 도달하는가를 측정하여 정의[7]하고 있다.

고장거리계산은 감지기(detector)가 전방(forward) 고장을 감지 하였을 때 동작을 개시한다. 전방에서의 고장 판정은  $S_1$  신호가 기준값(threshold)을 넘었을 때 이루어진다.

그림 1에서 고장 발생시 최초로 들어오는 파(incident wave)는 계전점을 지나 불연속인 모선측에 반사하는 파(reflect wave)로 고장지점을 향하게 된다. 이때, 계전 신호  $S_1$ 은 정해진 기준값 이상을 가지게 되고  $S_2$ 는 값이 변하지 않는다.

이산 상호 상관 함수의 최대값이 나타나는 시간은 전진파가 계전점을 떠나 고장점에서 반사하여 되돌아오는 시간( $2t_1$ )을 나타낸다. 따라서, 계전점에서부터 고장점까지의 거리는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \frac{\tau}{2} \cdot v \quad (16)$$

여기서, L : 계전점에서 고장점까지의 거리

$v$  : 선로에서의 전파속도( $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ )

$\tau$  : 이산 상호 상관 함수가 최대값을 갖는 시간

고장저항이 개입되어 원단에서 고장이 발생하는 경우 불연속면인 고장점에서 반사파와 투과파(transmit wave)가 발생하게 되고 이 투과파가 계전점으로 들어와 실제 고장거리보다 더 가깝게 고장거리( $2t_1$ )가 계산된다.

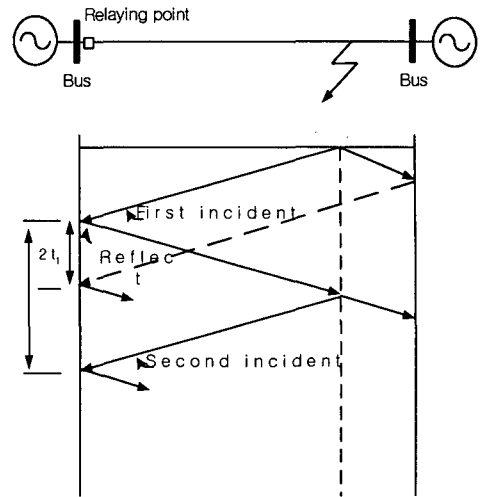


그림 1 Lattice diagram

Fig. 1 Lattice diagram

본 논문에서는 상대단으로부터 진행파가 최소한 한번 왕복하도록 보호구간의 전파시간의 2배 이상으로 설정하였고 정확한 전진파를 윈도우에 저장하기 위하여 기준값 이전의 2 샘플을 함께 저장하였다.

2.6 FIR(Finite Impulse Response) Filter

일반적으로 FIR Filter는 식 (17)과 같이 나타내어진다.

$$y(k) = x(k) - x(k - M) \quad (17)$$

여기서, k : data index

M : 필터 윈도우의 크기

중첩성분 중 고조파 성분은 전압 위상각 90°고장에서 최대가 되고 전압 위상각 0°고장에서 최소가 된다. 그리고 전류신호는 dc-오프셋(offset)에 비례하는데 이 dc-오프셋(offset) 성분은 전압 위상각 90°고장에서 최소가 되고 전압 위상각 0°고장에서 최대가 된다.

고장 위상각 0°에서 고장이 발생하면 전압, 전류의 성분이 모두 기본파 성분만 나타나게 된다. 따라서, 전압, 전류 성분 모두 고장시 발생하는 증가 성분이 매우 적게 나타나게 되어 계전 신호나 이산 상호 상관 함수에서 최대값이 나타나지 않게 되므로 고장거리를 계산 할 수 없다.

전압 위상각 0°고장 시 일반적인 해결방법[5]은 보정인자(correction factor)인  $(|1 + \cos \theta|)$ 를 식 (7)과 (8)에 나타나 있는 중첩 성분에 곱하여, 전진파, 후진파 신호를 확대하여 계전 신호나 이산 상호 상관 함수의 최대값을 계산하는 것이다. 여기서,  $\theta$ 는 고장 발생 시 전압 위상각이다. 그러나 이 해결방법 역시 고장 발생시 위상을 정확히 알기 어렵고 전압 위상각 0°근접 고장 시에는 전진파와 후진파에 전력주파수[60Hz] 성분만 나타나게 되어 정확한 거리계산이 되지 않는다. 본 논문에서는 FIR 필터를 적용하여 0°고장 및 근접 고장 시에도 이산 상호 상관 함수(discrete Cross Correlation)의 피크가 두드러지게 나타나게 되어 정확한 고장거리계산이 되도록 하였다.

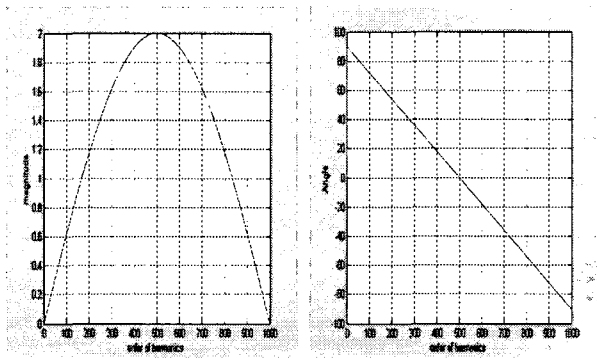
$$x(k) = X_m \sin n\theta_k \text{라고 가정하면,}$$

$$x(k-1) = X_m \sin(n\theta_k - n \cdot \frac{360^\circ}{N}) \text{이고}$$

$$y(k) = x(k) - x(k-1)$$

$$= X_m \sqrt{\{1 - \cos(n \cdot \frac{360^\circ}{N})\}^2 + \sin^2(n \cdot \frac{360^\circ}{N})} \sin(n\theta_k + \phi) \quad (18)$$

위의 식(18)은 FIR 필터의 주파수 응답 특성을 나타내었다. 최대 크기  $X_m$ 의 기본파를 본 논문에서 적용한 FIR 필터에 통과시키면 기본파에서 그 크기는 0.00628배가 되고 위상은 89.8° 앞서게 된다. 이 줄어든 기본파 크기는 보상을 하여 원래 신호의 기본파 크기와 같게 한다. 그림 2는 본 논문에서 적용한 FIR 필터의 주파수 크기 및 위상 특성이다.



a) 주파수 크기 특성      b) 주파수 위상 특성

그림 2 본 논문에서 적용한 FIR 필터의 주파수 특성

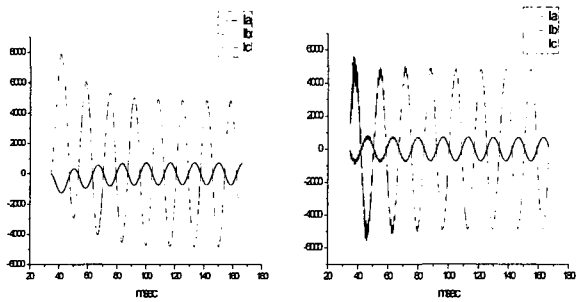
- a) Frequency magnitude response
- b) Frequency phase response

Fig. 2 An FIR filter frequency response which this paper proposed

본 논문에서 적용한 FIR 필터는 위상지연을 선형으로 설계하여 각 주파수별로 왜곡현상이 나타나지 않는다.

본 논문에서는 전압, 전류 신호 모두에 FIR 필터를 적용하여 고장 위상각 판단 없이 고장거리 계산에 들어가게 되어 알고리즘의 계산량 부담이 적다.

그림 3은 전압위상각 0° 근접 고장시 중첩성분을 나타낸 것이다. a)에서 보는 바와 같이 FIR 필터를 적용하기 전의 전류 중첩성분에는 dc-오프셋(offset) 성분과 전력주파수[60 Hz] 성분만을 가지게 됨을 알 수 있다. 그러나 b) FIR 필터를 적용한 후에는 dc-오프셋(offset) 성분이 제거되고 고주파(high frequency) 성분이 증폭된 것을 그림 3에서 볼 수 있다.



a) FIR 필터 미사용시      b) FIR 필터 사용시

그림 3 전압 위상각 0° 고장시 전류 중첩성분  
a) Not using an FIR filter, b) Using an FIR filter  
Fig. 3 Current superimposed component which fault has near zero-degree inception angle

## 2.7 진행파를 이용한 고장점 표정 알고리즘 흐름도

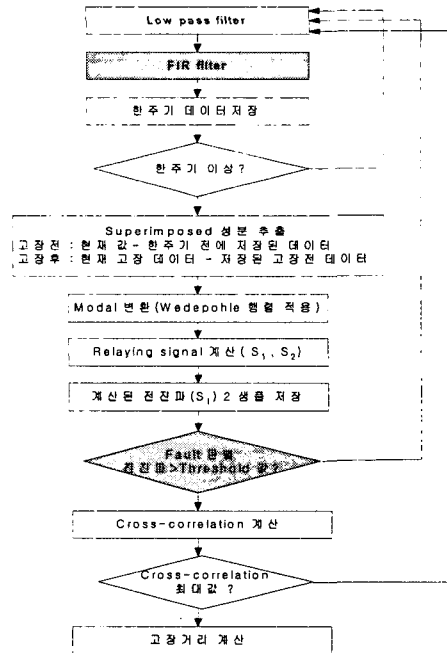


그림 4 진행파를 이용한 고장점 표정 흐름도

Fig. 4 A fault location flow chart using travelling wave

## 2.8 사례연구

### 2.8.1 EMTP 모델

본 논문에서 제안한 진행파를 이용한 고장점 표정 알고리즘을 검증하기 위하여 실제 한전 계통인 신곡천에서 신포항 구간을 모델링하여 1회선 345[KV] 3상 평형 송전 선로 100 [km] 계통을 EMTP(Electromagnetic Transients Program)를 사용하여 모의하였고 1선 지락고장 및 선간 단락을 대상으로 하였고 전압, 전류의 기본파를 이용하는 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 알고리즘과 비교를 하였다. 그림 5에 대상 계통도를 나타내었다. EMTP에 입력된 데이터는 표 1과 같다.

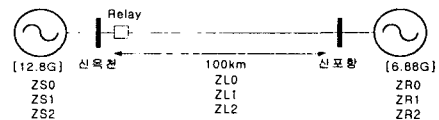


그림 5 EMTP 모의계통

Fig. 5 EMTP model system

표 1. EMTP 입력에 사용된 데이터

Table 1. Input data for EMTP

종류	R	L	C
ZS0	3.0584[Ω]	48.896[mH]	
ZS1	0.5667[Ω]	24.570[mH]	
ZS2	0.5667[Ω]	24.570[mH]	
ZR0	2.4809[Ω]	52.310[mH]	
ZR1	1.0356[Ω]	48.226[mH]	
ZR2	1.0356[Ω]	48.226[mH]	
ZL0	0.2511[Ω/km]	2.7058[mH/km]	0.0045[μF/km]
ZL1	0.0345[Ω/km]	0.9724[mH/km]	0.0117[μF/km]
ZL2	0.0345[Ω/km]	0.9724[mH/km]	0.0117[μF/km]

데이터 취득을 위한 샘플링 주파수는 60[kHz], 중첩 에러를 방지하기 위해 30[kHz] 차단 주파수 특성을 갖는 2차 Butterworth 저역 통과 필터를 사용하였다. 고장거리 계산에러는 식 (19)를 사용하여 산정하였다.

$$\%Error = \frac{\text{계산된거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \times 100 \quad (19)$$

### 2.8.2 1선 지락 고장

#### 2.8.2.1 FIR 필터의 영향

그림 6 a)는 전압 위상각 0° 고장일 경우 일반적인 해결방법인 보정인자 사용시는 고장 거리를 계산하기 위한 피크(peak)가 불분명하여 고장 거리 계산이 정확하지 않지만 b)에서 보는 바와 같이 전압 위상각 0° 고장일 경우에 FIR 필터 적용시 이산 상호 상관 함수의 피크(peak)가 분명하게 보여 정확한 고장거리계산이 가능하다.

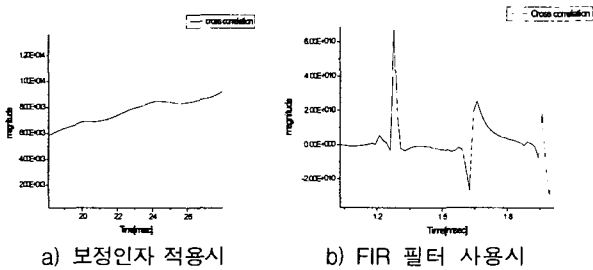


그림 6 correlation 파형

a) Using correction factor, b) Using an FIR filter

Fig. 6 Cross-correlation result

#### 2.8.2.2 전압위상각의 영향

그림 7은 양단 전원 위상차 10°이고 고장저항이 10[Ω]일때 전압 위상각 0°고장 및 전압 위상각 90° 고장에서 고장거리 계산 에러를 나타내었다. 고장 위치는 0.05[pu]~0.9[pu]까지 10단계로 나누어 오차의 변화추이를 나타내었다. 이때, 근접 고장 5[km] 고장 시에 0.1[%]로 정확한 고장거리계산 결과를 나타내었고 최대 오차는 0.9[pu]시 1.07[%]이다. 이는 고장 발생시 전원 위상각에 관계없이 1.1[%]미만의 오차 범위내로 정확도를 유지하고 있다. 본 논문에서는 자기단 정보만을 사용하였고 원단에서 고장이 발생할수록 오차가 증가한다.

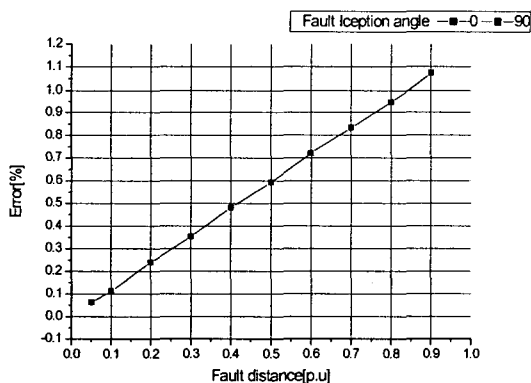


그림 7 전압 위상각 0° 및 90°고장시 고장거리계산 오차

Fig. 7 Fault location error which fault has near zero-degree and 90-degree inception angle

#### 2.8.2.3 고장저항의 영향

그림 8은 고장 저항의 변화에 따른 오차의 변화 추이를 나타낸 것이다. 고장저항의 변화에 따른 고장거리계산 오차를 보기 위하여 양단 전원 위상차 10°, 고장시 전력주파수 성분만을 가지고 고장거리계산이 어려우므로 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 검증하기 위해 전압 위상각 0°로 고정하여 고장저항을 0 [Ω]~30[Ω]까지 4단계로 변화시켰다. 본 논문에서 제안한 진행과를 이용한 고장점 표정 알고리즘은 고장저항 변화에 무관하게 최대오차 1.1[%]미만의 정확도를 유지하고 있다.

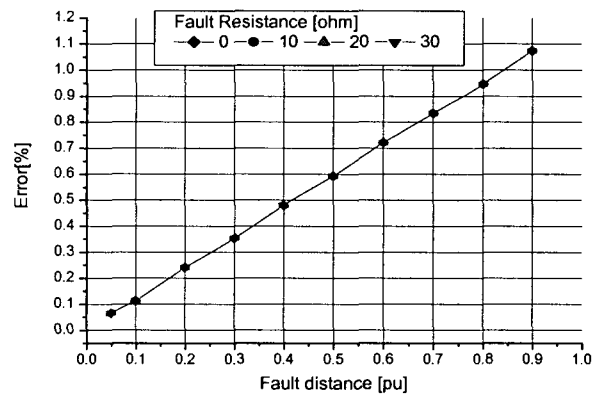


그림 8 고장저항을 변화시 고장거리계산 오차

Fig. 8 Fault location error with varying fault resistance

#### 2.8.2.4 부하전류의 영향

그림 9는 부하전류에 따른 오차를 나타내고 있다. 부하전류는 전원의 위상각 차이에 비례하므로 고장시 전압 위상각 0°, 고장저항 10[Ω]으로 고정하고 선로 최대 허용 전류를 고려하여 전원 위상차를 5°에서 20°까지 4단계로 나누어 변화시켰다. 본 논문에서 제안한 진행과를 이용한 고장점 표정 알고리즘은 부하전류 변화에 무관하게 최대오차 1.1[%]미만의 정확도를 유지하고 있다.

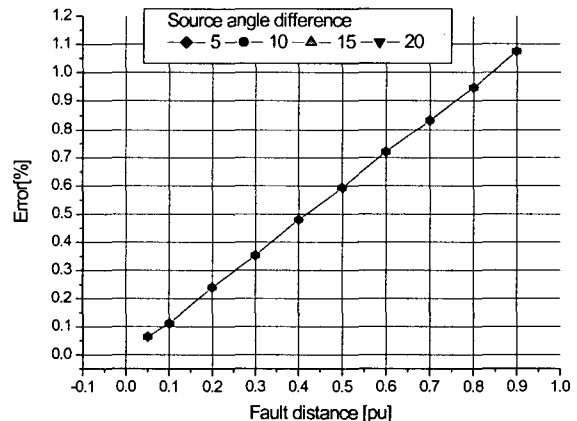


그림 9 부하전류 변화시 고장거리계산 오차

Fig. 9 Fault location error with varying load current

본 논문에서는 제안하는 진행파를 이용한 고장점 표정 알고리즘은 전압, 전류의 증첩성분을 추출하여 계전 신호로 사용하고 이산 상호 상관 함수의 최대값이 나타나는 시간을 이용하여 고장거리 계산을 하므로 부하전류의 변화에 영향에 무관한 알고리즘임을 알 수 있다.

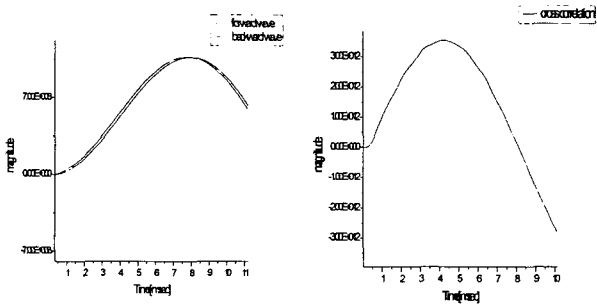
2.8.2.5 근접 고장시 고장점 표정

계전기 설치점으로부터 매우 가까이에서 난 고장은 그 파의 전파시간이 매우 짧고 샘플링 시간 보다 매우 짧기 때문에 FIR 필터를 사용하지 않을 경우 전진파나 후진파에서 피크가 나타나지 않게 되고 상호 상관 함수의 최대값을 구할 수 없게 된다. 일반적인 거리계전의 해결방법은 후진파의 실효치를 사용하게 된다[7].

본 논문에서는 전압 위상각 0° 일 경우 계전기 설치점 근접고장에 대한 고장거리계산을 해 보았다.

본 논문의 샘플링 주파수는 60[KHz]이다. 이는 1 point가 0.016[ms]에 해당하는 것이다. 본 논문에서는 aerial mode 2의 파의 진행속도를 296.47[km/msec]로 가정하였다. 본 논문 고장거리 계산은 이산 상호 상관 함수가 최대값을 가지는 시간을 사용한다. 이는 본 논문의 고장거리계산의 한계는 2.4[km]임을 의미한다.

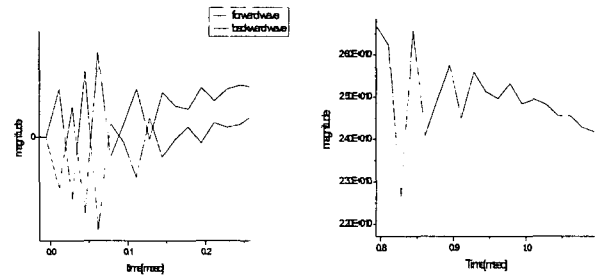
여기서는 실제 고장 거리가 2[km] 전압 위상각 0°고장일 때 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 사용하여 고장거리 계산의 결과를 알아보고자 한다.



a) 전 · 후진파 b) correlation  
 그림 10 FIR 필터를 사용하지 않았을 때 파형  
 a) Forward and backward wave  
 b) Cross-correlation

Fig. 10 A waveform which is not using an Fir filter

그림 10 a)는 FIR 사용하지 않은 2[km] 전압 위상각 0° 고장시 전 · 후진파를 나타내고 있고 b)는 2[km] 전압 위상각 0° 고장시 이산 상호 상관 함수를 나타낸 것이다. b)에 보는 바와 같이 이산 상호 상관 함수의 피크 값을 찾을 수 없다. 그림 11 a)는 본 논문에서 제안하는 FIR 필터를 적용하였을 때의 2[km] 전압 위상각 0° 고장시 전 · 후진파 파형을 나타낸 것이다.



a) 전 · 후진파 b) correlation  
 그림 11 FIR 필터 사용시 파형  
 a) Forward and backward wave  
 b) Cross-correlation

Fig. 11 A waveform which is using an FIR filter

b)에서 보는 바와 같이 전압 위상각 0° 2[km] 근접고장시 FIR 필터를 적용하면 이산 상호 상관 함수에 피크가 나타나게 되어 거리 계산이 가능하다.

표2는 근접 고장시 고장점 표정 결과를 나타내었다. 위에서 언급한 바와 같이 2.4[km] 이하 1[km]에 고장발생시 결과는 고장 거리 계산에 어려가 많이 있다.

표 2. 근접 고장시 고장점 표정

Table 2. Fault location with close up fault

고장 거리	오 차(%)
1[km]	3.94
2[km]	0.48

2.8.3 선간 단락

그림 12는 선간 단락 고장시 양단 전원 위상차 10°로 고정하고 전압 위상각 0° 및 90°고장에서 고장거리계산 에러를 나타내었다.

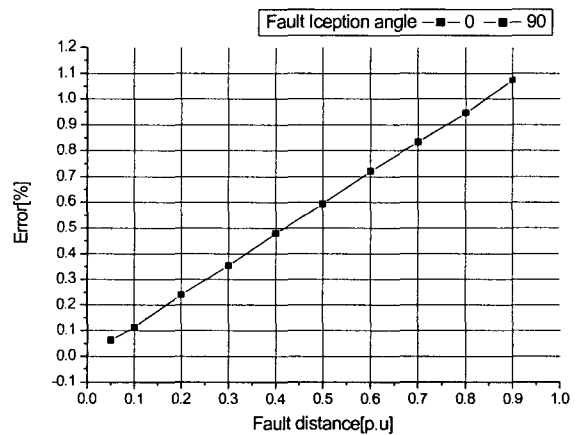


그림 12 선간 단락 고장시 0° 및 90° 고장점 표정  
 Fig. 12 Fault location which line to line fault has near zero-degree and 90-degree inception angle

그림 12에서 보는 바와 같이 1선 지락 고장과 같은 고장거리 계산 결과를 나타내고 있으며, 최대 오차 1.1[%]미만의 정확한 고장거리계산 결과를 나타내고 있다.

2.8.4 진행파와 임피던스 법에 근거한 알고리즘 비교

2.8.4.1 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 알고리즘

임피던스 법에 근거한 고장점 표정 알고리즘은 자기단 정보만 이용하여 고장 발생 시 양단에서 들어오는 전류 중첩 성분과 전류 분배계수를 이용하여 자기단에서의 고장거리가 포함되는 전압 방정식을 세워 고장거리를 구한다[13].

$$V_{GF} = mZ_l I_{GF} + R_f \times \frac{\Delta I_G}{d_s} \quad (20)$$

- 여기서,  $V_{GF}$  : 자기단 전압
- $m$  : 고장거리
- $Z_l$  : 정상분 라인 임피던스
- $I_{GF}$  : 자기단 전류
- $R_f$  : 고장 저항
- $\Delta I_G$  : 현재 고장전류 - 고장 전 부하전류
- $d_s$  : 전류 분배 계수

고장 시 양단에서 유입되는 전류의 위상이 같다고 가정하여 전류 분배계수의 역수( $\frac{1}{d_s}$ )는 0이 된다. 고장거리  $m$ 에 대한 식으로 정리를 하면 식 (21)와 같다.

$$m = \frac{Im(V_{GF} \times \Delta I_G^*)}{Im(Z_l \times I_{GF} \times \Delta I_G^*)} \quad (21)$$

2.8.4.2 고장저항의 변화에 따른 결과 비교

그림 13는 1선 지락 고장 시 양단 전원 위상차 5°로 고정하고 고장저항을 10[Ω]~30[Ω]까지 3단계로 변화시켰을 때 알고리즘별 고장거리계산 에러를 비교하여 나타내었다.

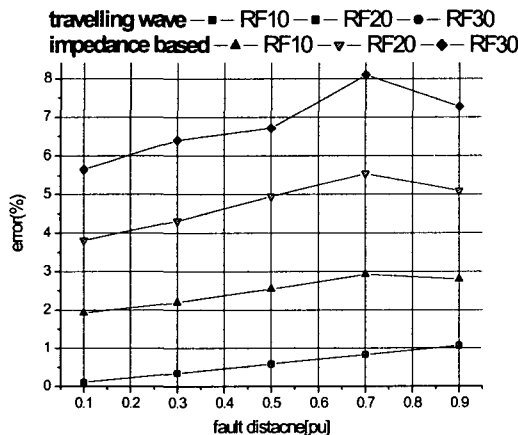


그림 13 고장저항 변화에 따른 진행파와 임피던스 법 비교  
Fig. 13 Compare travelling wave method to impedance method with varying fault resistance

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 고장저항 변화에 따른 오차가 변화하지 않음을 보이니 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 결과는 고장저항이 증가할수록 오차가 증가함을 알 수 있다.

2.8.4.2 부하전류의 변화에 따른 결과 비교

그림 14는 1선 지락 고장 시 고장 저항을 10[Ω]로 고정하고 선로 최대 허용 전류까지 고려하여 양단 위상차를 5°~15°까지 4단계로 변화시켰을 때 알고리즘별 고장거리계산 에러를 비교하여 나타내었다.

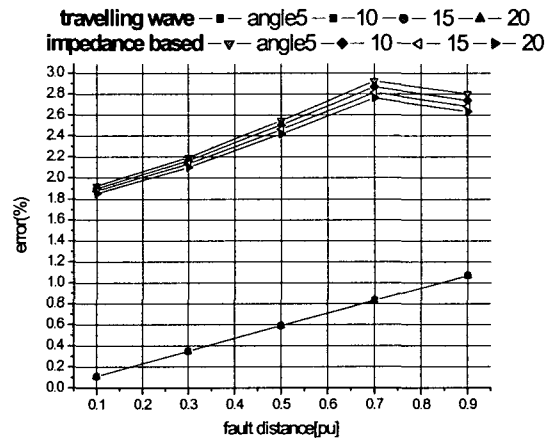


그림 14 알고리즘별 양단 위상 변화에 따른 결과 비교  
Fig. 14 Compare travelling wave method to impedance method with varying source impedance

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 부하전류에 따른 오차가 변화하지 않음을 보이니 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 결과는 식 (20)에서 양단 위상차를 없다고 가정하여 부하전류의 변화시 고장 거리계산 결과가 영향을 받음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 진행파를 이용한 송전선로 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 진행파를 이용한 고장점 표정에서 전압 위상각 0° 및 그 근처의 고장 발생시 일반적인 해결방법은 보정인자를 사용하는 것이다. 그러나 이 방법 역시 이산 상호 상관 함수의 피크를 정확하게 판단할 수 없어 정확한 고장거리 계산이 되지 않았다.

본 논문에서는 FIR 필터를 사용하여 고장 발생시 전압 위상각 판단 없이 dc-오프셋(offset)을 제거하고 고주파 성분을 증폭한 계전 신호를 사용함으로써 정확한 고장거리계산 결과를 나타내었다.

사례연구 및 임피던스 법에 근거한 고장점 표정 결과 비교를 통하여 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 고장 발생시 전압 위상각, 고장저항, 양단전원 위상차에 비례하는 부하전류의 변화에도 고장 거리 계산 결과가 영향을 받지 않음을 보였다. 그리고 별도의 통신수단이 없이 자기단 정보만을 사용하여 최대 오차 1.1[%]이내의 정확한 결과를 나타내었다.

**감사의 글**

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

**참 고 문 헌**

[1] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9, No. 9, pp.680-689, 1994.

[2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part I- Fourier Transform Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 3, pp.1316-1323, 1988.

[3] M. S. Sachdev, R. Agarwal, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Relay Measurements", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 1, pp.121-129, 1988.

[4] M. Vintins, A Fundamental Concept for High Speed Relaying, IEEE Trans., PAS-100, No.1, 1607, 1981

[5] A.T. Johns, Ultra-High Speed Directional Comparison Technique for the Protection of E.H.V. Transmission Lines, IEE Proc., Vol. 127, No. 4.

[6] P.A. Crossley, P.G. McLaren, Distance Protection Based on Travelling Waves, IEEE Trancs., PAS-102, No. 9, 2971, 1983

[7] E.H. Shehab-Eldin and P.G. McLaren, Travelling Wave Distance Protection-Problem Areas and Solutions, IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 3, No. 3, 894, 1988.

[8] Z Q Bo, A T Johns, R K Aggarwal, "A Novel Fault Locator Based on the Detection of Fault Generated High Frequency Transients", IEE Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, Conference Publication No. 434, pp. 197~200 1.

[9] C.Christopoulos 외 3명, "Signal processing and discriminating techniques incorporated in a protective scheme based on travelling waves" IEE PROCEEDINGS Vol.136,Pt. C,No 5,SEPTEMBER pp. 279-288, 1989.

[10] P. K. Dutta and P. B. Dutta Gupta "Microprocessor-Based UHS Relaying For Distance Protection Using Advanced Generation Signal Processing" IEEE Transactions on power Delivery, Vol. 7. No.3, July pp. 1121-1128, 1992.

[11] Pritindra Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", JOHN WILEY & SONS INC. pp. 10-30.

[12] A.T Johns and S.K salman "Digital Protection For Power Systems", Peter Peregrinus Ltd. pp. 115~170.

[13] "Advancements In Microprocessor Based Protection And Communication", IEEE TUTORIAL Course. pp. 63-65.

**저 자 소 개**



**강 상 희(姜相熙)**

1962년 8월 15일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 명지대 공대 전기정보 제어공학부 교수. 차세대전력기술연구센터 연구원.

Tel : 031-330-6364, Fax : 031-321-0271  
E-mail : shkang@mju.ac.kr



**김진한(洪吉東)**

1974년 5월 14일생. 2003년 명지대 공대 전기 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)제노벨 근무.

Tel : 02-501-2885, Fax : 02-501-4484  
E-mail : ginani74@hanmail.net