

SWT와 진행파를 이용한 지중송전계통 고장점 추정 기법 개발

論 文
57-2-6

Development of Fault Location Method Using SWT and Travelling Wave on Underground Power Cable Systems

鄭彩均* · 李鍾範†
(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee)

Abstract - The fault location algorithm based on stationary wavelet transform was developed to locate the fault point more accurately. The stationary wavelet transform(SWT) was introduced instead of conventional discrete wavelet transform(DWT) because SWT has redundancy properties which is more useful in noise signal processing. In previous paper, noise cancellation technique based on the correlation of wavelet coefficients at multi-scales was introduced, and the efficiency was also proved in full. In this paper, fault section discrimination and fault location algorithm using noise cancellation technique were tested by ATP simulation on real power cable systems. From these results, the fault can be located even in very difficult and complicated situations such as different inception angle and fault resistance.

Key Words : Fault location, Noise cancellation method, SWT, Travelling wave, Underground power cable systems

1. 서 론

웨이브렛 변환(Stationary wavelet transform)의 일반적인 특징은 과도신호를 시간영역과 주파수영역에서 검출할 수 있는 장점이 있으며, 특히 시간영역에서 분석이 가능하기 때문에 고장점 추정의 적용에 매우 유리하고, 진행파 이론의 적용이 매우 용이하다[1-5].

지중송전계통에서 고장발생시 과도신호는 케이블의 한쪽 또는 양단에서 검출이 가능하다. 이들 방법 중 편단정보를 이용한 방법은 케이블 양 모선간의 정보교환이 필요 없으므로 더욱 실용적이며, 양 모선간의 데이터 전송시 시간의 동기화에 의해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있어 정확도 면에서 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 편단정보를 이용한 방법은 고장거리 추정에 앞서 발생한 고장이 케이블의 중간점을 기준으로 전단부인지 후단부 인지를 판별해야 하는 단점을 가지고 있다. 후단부 고장의 경우에는 케이블을 따라 과도신호가 진행하면서 많은 감쇄가 발생하여 측정모선에 이르는 신호가 약해질 수 있어 고장점 추정에 장애요소로 작용할 수 있다. 일반적으로 케이블 계통에서의 진행파는 감쇄현상으로 신호가 약해지며[6], 시스의 크로스분당과 절연통보호장치(SVL), 접지저항 등의 영향으로 과도신호에 많은 노이즈가 포함되어 있다. 따라서, 케이블 과도현상에서 발생하는 노이즈의 레벨은 반사파 레벨 보다 더욱 크게 나타날 수 있으므로 반사파 신호로부터 노이즈를 제거하

는 필터의 개발은 케이블 계통의 고장점 추정에 있어 매우 중요한 부분으로 본 저자는 지중송전계통 노이즈 제거 알고리즘을 이미 개발하여 소개하였으며, 노이즈 제거기법의 효과를 검증하였다[7]. 본 논문에서는 노이즈 제거기법을 실제 통 시뮬레이션을 통해 고장구간을 판별하고 고장점을 추정하는 알고리즘에 적용하였으며 고장위치, 고장위상, 고장저항 등 다양한 고장조건에 사례분석을 통해 고장점 추정 알고리즘을 검증하였다. 그림 1에서는 새로운 고장점 추정 기법의 개략도를 나타내었다.

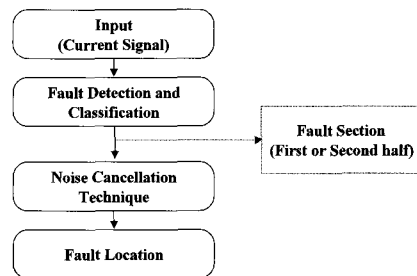


그림 1 고장점 추정 개략도
Fig. 1 Outline of fault location

2. 모델계통

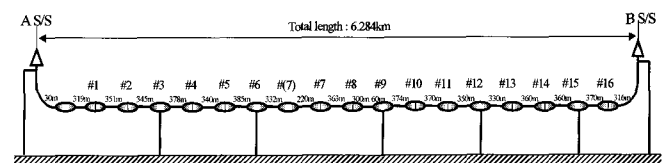


그림 2 지중송전계통 모델
Fig. 2 Model of underground power cable system

† 교신저자, 正會員 : 圓光大 工大 電氣電子 및 情報工學部
教授 · 工博

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr

* 正會員 : 韓電 電力研究院 研究員 · 工博

接受日字 : 2007年 11月 27日

最終完了 : 2007年 12月 30日

본 논문에서 검토한 지중송전계통은 154kV, OF 2000mm² 케이블로 총 선로길이가 6.284km인 실제통 모델이다. 그림 2는 본 논문에서 적용한 5개 섹션의 크로스본드 대구간과 16개의 접속부를 가지고 있는 실제통 모델의 계통도이다.

고장점 추정기법 검증을 위해 그림 2의 실제통에서 발생한 1선지락고장을 고려하였으며, 이의 모델링 및 해석을 위해 ATP를 이용하였다. 샘플링율은 1MS/sec이며, 진행파의 전파속도는 1.67487×10⁸km/sec이다. 또한 더욱 신뢰성 있는 검증을 위해 다음과 같은 다양한 고장조건을 적용하였다.

- 고장상 : A상, B상
- 고장발생 위상 : 0°, 30°, 45°, 60°, 90°
- 고장저항 : 0Ω, 0.1Ω, 0.5Ω, 1Ω, 5Ω
- 고장거리 : A S/S로부터 1km, 2km, 3km, 4km, 5km

3. Stationary Wavelet Transform(SWT)

SWT를 이용한 방법은 고역 필터와 저역 필터를 이용하여 각 단계에 따라 분석할 수 있으며, 이 과정은 DWT의 다운샘플링과 같은 과정이 없으므로 원신호와 같은 길이를 가지게 된다. SWT의 이론은 다음과 같이 설명할 수 있다 [8-10].

만약 $f(x)$ 가 $V_j = (\dots \subset V_3 \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0)$ 의 각 단계 j 에서 설정된다고 가정하면 이는 스케일링 함수 $\phi(x)$ 를 가지는 $f(x)$ 의 스칼라 성분 $C_{j,k}$ 에 의해 정의된다.

$$C_{j,k} = \langle f(x), \phi(x) \rangle \quad (1)$$

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{-j}\phi(2^{-j}x - k) \quad (2)$$

여기서, $\phi(x)$ 는 스케일링 함수, 즉 저역 필터이고, $C_{j,k}$ 는 2^j 에서 Discrete approximation signal이다.

만약 $\psi(x)$ 가 웨이블릿 함수이면, 웨이블릿 계수는 식 (3)에 의해 얻어진다.

$$\omega_{j,k} = \langle f(x), 2^{-j}\psi(2^{-j}x - k) \rangle \quad (3)$$

여기서, $\omega_{j,k}$ 는 2^j 에서 Discrete detail signal이다.

$C_{j,k}$ 에서 스케일링 함수 $\phi(x)$ 의 특성은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, $C_{j+1,k}$ 에서는 $C_{j,k}$ 로부터 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2}\phi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_n h(n)\phi(x-n) \quad (4)$$

$$C_{j+1,k} = \sum_n h(n-2k)C_{j,n} \text{ and } \frac{1}{2}\psi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_n g(n)\phi(x-n) \quad (5)$$

또한, $\langle f(x), 2^{-(j+1)}\psi(2^{-(j+1)}x - k) \rangle$ 는 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_{j+1,k} = \sum_n g(n-2k)c_{j,n} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 기존의 DWT 변환의 Multi-resolution

알고리즘이며, 이 변환에서는 다운샘플링이 적용되므로 $f(x)$ 의 총길이는 변환 후 1/2로 줄어들게 된다. 이 과정은 함수의 길이가 1이 될 때까지 반복된다.

그러나 SWT는 다운샘플링 대신에 컨벌루션 수행 전에 각 스케일에서 Unsampling 과정이 선행되며, 스케일 j 에서 그 다음 단계인 $C_{j-1,k}$ 까지 2의 Factor에 의해 증가하는 샘플링 사이의 거리는 식 (7)과 같고, DWT에서는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{j+1,k} = \sum_l h(l)C_{j,k+2l} \quad (7)$$

$$\omega_{j+1,k} = \sum_l g(l)C_{j,k+2l} \quad (8)$$

4. 노이즈 제거 기법

본 저자는 고장 발생시 나타나는 과도신호에 대한 Multi-Scale 웨이블릿 분석을 통해 검출된 신호의 상호관계(correlation)를 이용한 노이즈를 제거 알고리즘을 개발하였으며[7], 노이즈 제거과정은 그림 3과 같다.

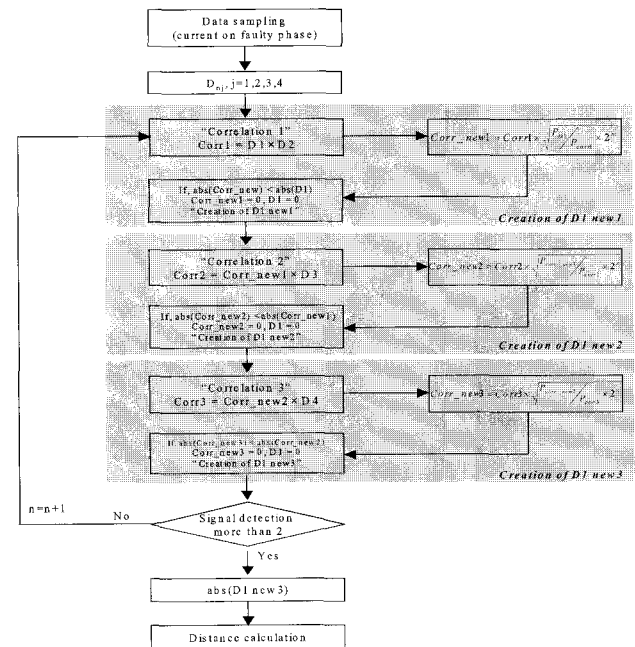


그림 3 고장점 추정을 위한 노이즈 제거 기법의 흐름도

Fig. 3 Flow chart of noise cancellation technique for fault location

D1과 D2의 Detail 성분을 식 (9)와 같이 직접 곱하여 "Corr1"이 생성되고, 다음으로 식 (10)같은 correlation 방정식을 얻는다. 마지막으로 "Corr new1"과 "D1" 절대값의 대소비교를 통해 새로운 Detail 성분인 D1 new1을 생성하게 된다.

$$Corr1 = D_1 \times D_2 \quad (9)$$

$$Corr\ new1 = corr1 \times \sqrt{\frac{P_{D1}}{P_{corr1}}} \times 2^n \quad (10)$$

$$\text{여기서, } P_{D1} = \sum D_1^2, P_{corr1} = \sum corr1^2$$

다음으로 식 (11)과 같이 "Corr new1"과 "D3"를 직접 곱하여 "Corr2"를 얻고 새로운 Correlation 성분인 "Corr new2"를 식 (12)와 같이 재 스케일 하게 된다. 이 과정을 통해 D1 new2를 얻을 수 있다.

$$Corr2 = Corr\ new1 \times D_3 \tag{11}$$

$$Corr\ new2 = corr2 \times \sqrt{\frac{P_{Corr\ new1}}{P_{corr2}} \times 2^n} \tag{12}$$

마지막으로 식 (13)과 (14)처럼 "Corr3"와 "Corr new3"의 성분을 얻고 D1 new1과 D1 new2와 같은 방법으로 D1 new3을 생성시킨다.

$$Corr3 = Corr\ new2 \times D_4 \tag{13}$$

$$Corr\ new3 = corr3 \times \sqrt{\frac{P_{Corr\ new2}}{P_{corr3}} \times 2^n} \tag{14}$$

위와 같은 과정을 거쳐 최종적으로 D1 new3에 2개 이상의 과도신호가 검출되면 고장점 추정이 이루어지고 단자 1개의 신호가 검출되면 다음 차수(n=2, 3, ...)에서 2개 이상의 신호가 검출될 때까지 알고리즘은 반복된다.

5. 고장점 추정 기법 개발

5.1 Bewely lattice diagram

지중송전계통에서 지락고장 발생시 고장점에서 발생하는 진행파는 양단모선 방향으로 진행하며 모선에 도달한 신호는 반사된 후 변이점으로 작용하는 고장점에서 다시 투과와 반사를 반복하게 된다[10]. 이처럼 과도현상으로 인해 발생한 진행파는 케이블을 따라 신호가 완전히 소멸할 때까지 고장점 및 양단모선에서 투과와 반사를 반복하게 된다. 그림 4와 그림 5에서는 이러한 진행파의 특성을 Bewely lattice diagram으로 도식화하여 나타내었다.

그림 4는 케이블의 중간점을 기준으로 전반부에 고장 발생시 진행파의 특성을 보여주는 Bewely lattice diagram이다. 그림에서처럼 고장발생과 동시에 진행파는 A S/S와 B S/S 양 모선방향으로 진행된 후, A S/S의 두 번째 신호는 상대단 모선(B S/S)에서 반사되는 신호보다 고장점에서 반사되는 신호가 먼저 도달하게 된다. 반면에 B S/S에 도달하는 두 번째 신호는 고장점보다 상대단 모선(A S/S)에서 반사되는 신호가 먼저 도달하는 것을 알 수 있다. 즉, A S/S에서 측정된 두 신호에 의한 고장거리는 "X"에 대한 정보를 가지고 있는 반면 B S/S에서 측정된 신호에서의 고장거리는 "L-X"에 대한 정보를 가지고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 5처럼 케이블의 중간점을 기준으로 후반부에 발생한 고장의 경우에는 B S/S에 두 번째 도달하는 신호는 고장점에서 반사되는 신호인 반면 A S/S에 두 번째 도달하는 신호는 상대단 모선(B S/S)에서 반사되는 신호가 고장점에 반사되는 신호보다 먼저 도달하고 있음을 알 수 있다. 즉, 후

반부 고장의 경우는 전반부 고장과 반대로 A S/S와 B S/S 모선에서 측정되는 두 신호는 각각 "L-X"와 "X"에 대한 정보를 가지게 된다. 따라서, 판단정보를 이용하는 경우에는 반드시 발생한 고장이 전반부 고장인지 혹은 후반부 고장인지를 판별하는 고장구간 판별이 선행되어야 한다.

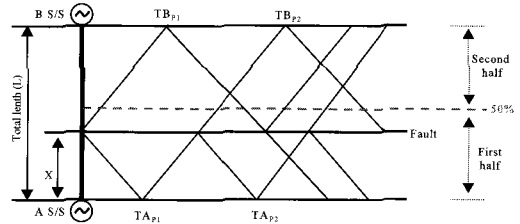


그림 4 전반부 고장시 진행파 특성

Fig. 4 Travelling wave characteristic in the case of first half fault

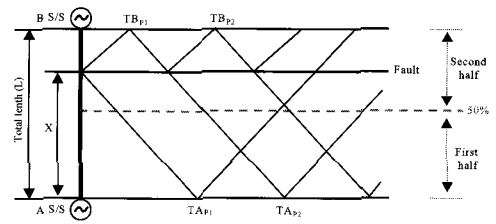


그림 5 후반부 고장시 진행파 특성

Fig. 5 Travelling wave characteristic in the case of second half fault

지중송전계통에서 고장발생시 고장점까지의 거리계산을 위해 A S/S나 B S/S의 판단정보만을 이용하는 방법은 양단 모선간의 정보교환이 필요 없으며, 한쪽 모선에서만 시스템이 구축됨으로 실용성 및 경제성면이 우수할 뿐 아니라 양단모선간의 데이터 전송시 시간 동기화에 의해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 판단정보만을 이용할 경우에는 전반부와 후반부의 고장구간에 따라 진행파의 흐름이 다르게 나타남으로 반드시 고장점 추정이 전에 고장구간 판별이 선행되어야 한다는 단점이 있다. 한편 양단정보를 이용한 방법은 양단 모선간의 데이터 전송이 반드시 필요하며 고장거리 환산시 시간 동기화에 의해 "(TApl-TBpl)"에서 발생할 수 있는 오차를 감수해야 하는 단점이 있다.

5.2 고장점 추정 기법

위의 판단 및 양단정보를 이용한 고장점 추정기법의 분석에서도 알 수 있듯이 기존의 두가지 방법은 모두 지중송전계통 적용에 있어 결정적인 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 위의 2가지 방법에서 나타나는 장점을 극대화하고 단점을 극복할 수 있는 새로운 기법을 제안하게 되었다. 제안한 방법은 위의 두가지 방법을 혼합한 새로운 형태로 고장점까지의 거리계산은 판단정보에서 측정된 신호로만 수행된다. 이 경우 문제점으로 나타났던 고장구간 판별은 양단에서 검출된 첫 번째 신호검출 시점의 지연시간을 이용함으로써 고장구간판별이 가능하게 하였다.

즉, “ $(TA_{p1}-TB_{p1})$ ”이 음수일 경우는 A S/S를 기준으로 전단부 고장으로 판별되며, 양수인 경우는 후단부 고장, 0인 경우는 정확히 중간점 고장으로 판별하게 된다. 또한 고장점에서 가까운 모선의 신호를 이용하므로 케이블 감쇄에 의한 신호검출의 어려움도 극복할 수 있으며, 양단정보는 고장구간 판별에만 적용되며 실제 고장거리계산은 편단정보만 가지고 이루어지므로 양단정보 이용시 나타났던 시간 동기화에 따른 오차 발생 가능성도 없다.

본 논문에서 제안한 기법의 장점을 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 전단부 및 후단부 고장구간 판별 가능
- 신호 감쇄에 의한 신호검출의 어려움 해소
- 시간 동기화에 따른 오차 발생 가능성 제거

그림 6에서는 본 논문에서 제안한 고장점 추정기법의 간략도를 나타내었다. 고장점까지의 거리계산은 측정점(A S/S)을 기준으로 전단부 및 후단부 고장에 따라 식 (15)와 식 (16)을 적용한다.

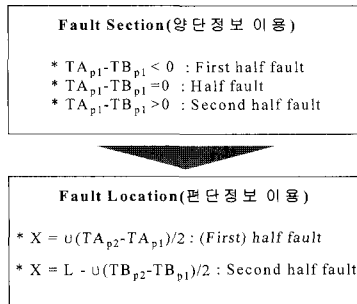


그림 6 새로운 고장점 추정기법 간략도
Fig. 6 Outline of new method for fault location

$$X = \frac{v \cdot (TA_{p2} - TA_{p1})}{2} \quad (15)$$

$$X = L - \frac{v \cdot (TB_{p2} - TB_{p1})}{2} \quad (16)$$

여기서,

X : 고장점까지의 거리[km]

L : 케이블 총 선로길이[km]

v : 케이블 전파속도[km/sec]

TA_{p1}, TB_{p1} : A S/S에서 진행과 도달시간[sec]

TB_{p1}, TB_{p2} : B S/S에서 진행과 도달시간[sec]

5.3 고장구간 판별

고장점 추정을 위해 제안한 알고리즘 수행을 위해서는 먼저 발생한 고장이 중간점을 기준으로 전단부인지 혹은 후단부인지를 구분하는 고장구간 판별이 이루어져야 한다. 그러므로 그림 7과 같이 양단 모선에서 측정된 신호를 그림 3의 노이즈 제거 알고리즘에 적용시켜 양단 모선에서 측정된 신호에서 1차 필터링과정을 거친 후 추출된 $D1_{new1}$ 신호의 시간간격을 이용해 고장구간을 판별한다. A S/S에서 추출한 $D1_{new1}$ 신호의 첫 번째 피크값에 도달하는 시간을 TA_{p1} , B S/S에서 추출한 신호가 TB_{p1} 일 때 이 두 신호의 차

$(TA_{p1}-TB_{p1})$ 이 음수이면 전단부 고장(first half fault), 양수이면 후단부 고장(second half fault), 0이면 중간점 고장(half fault)으로 구분하게 된다.

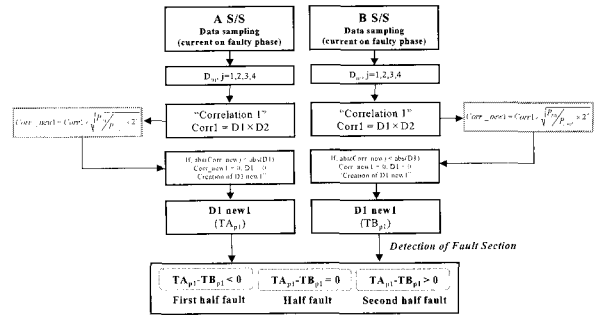
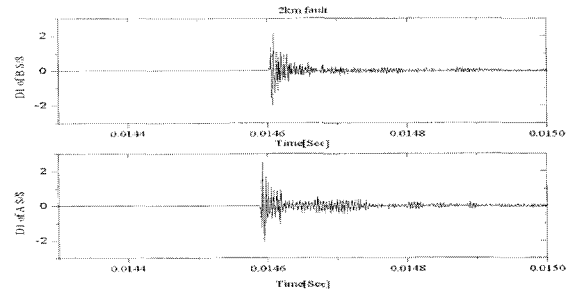
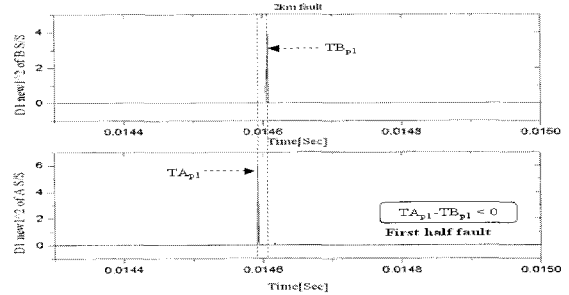


그림 7 고장구간 판별 알고리즘
Fig. 7 Algorithm for detection of fault section

그림 8은 2km 고장시 고장구간 판별 과정을 대표적으로 나타내었다. 2km고장에서는 TA_{p1} 이 TB_{p1} 에 비해 빠르게 검출되며 고장구간 판별 결과 “ $TA_{p1}-TB_{p1}$ ”은 음수로 판별되어 정확하게 전단부 고장으로 판별하게 된다. 판별에 사용되는 $D1_{new1}$ 의 신호는 1차 노이즈 필터링 과정을 거친 신호로 노이즈에 의한 영향 또한 최소화 할 수 있다.



(a) $D1$ of A S/S and B S/S



(b) $D1_{new1}$ of A S/S and B S/S

그림 8 2km A상 고장시 고장구간 판별 과정(고장저항:0Ω, 고장위상:45°)

Fig. 8 Detection procedure of fault section at 2km fault(Faulty phase : A, Fault resistance : 0Ω, Fault inception angle : 45°)

6. 고장점 추정 기법 사례 분석

그림 2의 실계통 모델을 이용해 새롭게 개발된 고장점 추정기법을 검증하였다. 모델링 및 해석을 위해 EMTP/ATP

를 이용하였으며, 다양한 고장조건을 위해 고장상인 A상과 B상에서 각각 고장거리(1km, 2km, 3km, 4km, 5km), 고장 발생위상(0°, 30°, 45°, 60°, 90°) 및 고장저항(0Ω, 0.1Ω, 0.5Ω, 1Ω, 5Ω) 등을 변화시켰다. A상 고장의 경우는 고장 발생위상 30°~90°에서 고장거리와 고장저항에 따라 100개 고장조건을 고려하였으며, B상 고장에서는 0°~90°의 고장 발생위상에서 125개의 고장조건을 고려하였다. 즉, 총 225개 고장조건을 다양하게 적용하여 본 논문에서 제안한 알고리즘을 검증하였다.

본 논문의 고장점 추정은 각각의 고장에서 고장검출과 고장상 판별 과정을 거친 후 고장구간이 판별 되면 Multi-scale Correlation 기법을 이용해 3단계에 걸쳐 신호를 필터링하게 된다. 필터링 과정을 거쳐 최종적으로 노이즈가 제거된 새로운 신호가 출력되면 피크값에 이르는 시간을 검출하여 고장구간에 따라 식 (15)와 식 (16)을 이용해 고장점까지의 거리를 계산하며, 거리계산에서 발생하는 오차는 식 (17)에 의해 산정한다. 본 논문에서 모델링 한 OF 2000mm² 케이블의 전파속도는 1.67487×10⁵km/sec이다.

$$E(\%) = \frac{|actual\ location - calculated\ location|}{total\ cable\ length} \times 100\% \quad (17)$$

그림 9에서는 고장저항이 1Ω이고 고장위상이 60°인 1선 지락고장이 1km 지점 A상에서 발생하였을 때 측정점(A/S/S)에서 검출한 고장전류 파형을 나타내었으며, 그림 10에서는 각 단계별 노이즈 제거과정을 나타내었다. 그림에서처럼 D1 신호에는 다량의 노이즈가 함유되어 있으나, D1 new1과 D1 new2의 과정을 거치면서 노이즈는 현저히 저하되며 D1 new3신호를 통해 정확히 반사되는 시간을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 노이즈 제거과정은 반복 과정 없이 첫 번째 차수(n=1)에서 완료하였다. 고장구간 판별 결과 TA_{pl}은 0.01528초 TB_{pl}은 0.015306초로 “TA_{pl}-TB_{pl}”은 음수로 판명되어 전반부 고장으로 판별하였다. 따라서 식 (15)에 최종적으로 검출된 진행과 도달시간 TA_{pl} 0.01528초와 TA_{p2} 0.015292초, 전파속도 1.67487×10⁵km/sec를 적용해 계산한 결과 식 (18)에서처럼 계산거리는 1.005km로 매우 정확하게 계산됨을 확인하였다. 계산오차는 0.079%이다.

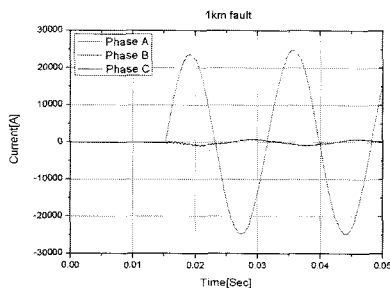


그림 9 1km A상 1선지락고장시 고장전류 파형(고장저항:1Ω, 고장위상:60°)

Fig. 9 Fault current at 1km single line to ground fault of phase A(Fault resistance : 1Ω, Fault inception angle : 60°)

$$X = \frac{1.67487 \times 10^5 (0.015292 - 0.01528)}{2} = 1.005 [km] \quad (18)$$

$$E = \frac{|1 - 1.005|}{6.284} \times 100 = 0.079 [\%] \quad (19)$$

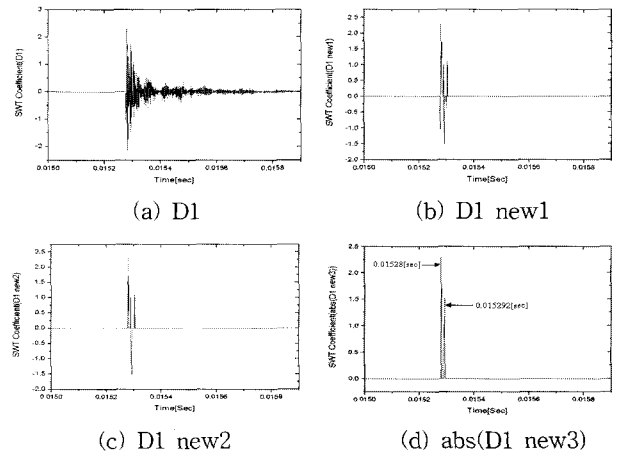


그림 10 1km A상 1선지락고장시 고장점 추정기법 적용결과 (고장저항:1Ω, 고장위상:60°, n=1)

Fig. 10 Application results at 1km single line to ground fault of phase A(Fault resistance : 1Ω, Fault inception angle : 60°, n=1)

그림 11에서는 고장저항이 0Ω이고 고장위상이 45°인 1선 지락고장이 2km 지점 B상에서 발생하였을 때 각 단계별 노이즈 제거과정을 나타내었다.

노이즈 제거과정은 두 번째 차수(n=2)에서 완료되었으며, 각 단계를 거치면서 노이즈가 효과적으로 제거됨을 알 수 있다. 또한 TA_{pl}은 0.014593초 TB_{pl}은 0.014606초로 “TA_{pl}-TB_{pl}”은 음수로 판명되어 고장구간은 전반부로 판별되었다. 따라서 식 (15)에 abs(D1 new3)에서 검출된 진행과 도달시간 TA_{pl}은 0.014593초, TA_{p2} 0.014617초를 적용해 계산한 결과 식 (20)에서처럼 계산거리는 2.009km로 매우 정확하게 계산됨을 확인하였다. 계산오차는 식 (21)에서처럼 0.143%이다.

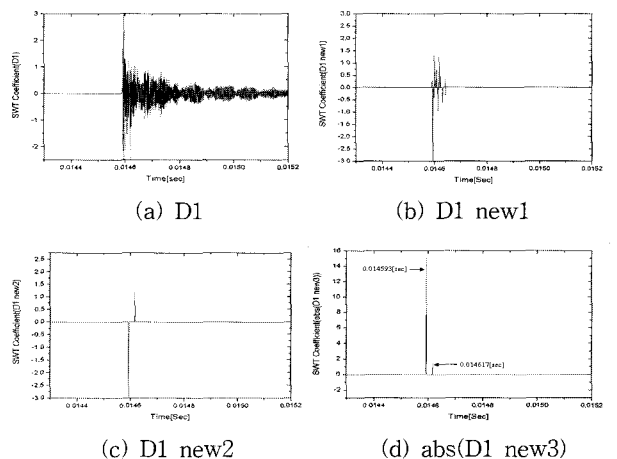


그림 11 2km B상 1선지락고장시 고장점 추정기법 적용결과 (고장저항:0Ω, 고장위상:45°, n=2)

Fig. 11 Application results at 2km single line to ground fault of phase B(Fault resistance : 0Ω, Fault inception angle : 45°, n=2)

$$X = \frac{1.67487 \times 10^5 (0.014617 - 0.014593)}{2} = 2.009 [km] \quad (20)$$

$$E = \frac{|2 - 2.009|}{6.284} \times 100 = 0.143 [\%] \quad (21)$$

다음으로 고장저항이 0.1Ω이고 고장위상이 30°인 1선지락고장이 5km 지점 A상에서 발생하였을 때 노이즈 제거과정은 두 번째 차수(n=2)에서 완료되었으며, 그림 12에서는 $D1_{new1}$ 과 $abs(D1_{new3})$ 의 신호를 각각 나타내었다. 위 고장조건을 통해 분석한 고장검출 및 고장상 판별 결과와 고장구간 판별 결과를 요약하면 다음과 같다.

○ 고장구간 판별

$$TA_{p1} : 0.013918초, TB_{p1} : 0.013912초$$

$$\therefore TA_{p1} - TB_{p1} > 0(\text{후단부 고장으로 판별})$$

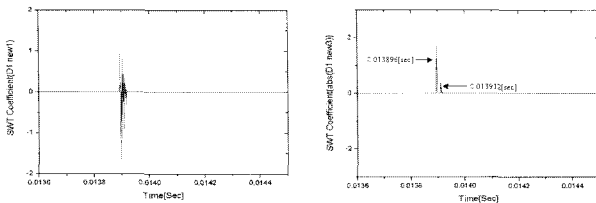
○ $abs(D1_{new3})$ 에서 검출된 진행과 도달시간

$$TB_{p1} : 0.013912초, TB_{p2} : 0.013986초$$

위에서처럼 정확하게 고장검출 및 후단부 고장으로 고장구간 판별이 이루어지며, $abs(D1_{new3})$ 에서 검출된 진행과 도달시간을 식 (16)에 적용해 계산한 결과 식 (22)에서처럼 계산거리는 4.944km로 매우 정확하게 계산됨을 확인하였다. 계산오차는 0.891%이다.

$$X = 6.284 - \frac{1.67487 \times 10^5 (0.013912 - 0.013896)}{2} = 4.944 [km] \quad (22)$$

$$E = \frac{|5 - 4.944|}{6.284} \times 100 = 0.891 [\%] \quad (23)$$



(a) $D1_{new1}$

(b) $abs(D1_{new3})$

그림 12 5km A상 1선지락고장시 고장점 추정기법 적용결과 (고장저항:0.1Ω, 고장위상:30°, n=2)

Fig. 12 Application results at 5km single line to ground fault of phase A(Fault resistance : 0.1Ω, Fault inception angle : 30°, n=2)

표 1에서는 A상에서 1선지락고장 발생시 본 논문에서 고려한 모든 고장거리 및 고장위상, 고장저항 중 고장저항이 0.1Ω일 때의 결과를 나타내었다. 또한 표 2에서는 고장저항이 1Ω인 경우 B상에서 1선지락고장 발생시의 결과이다. 표에서처럼 본 논문에서 개발한 새로운 고장점 추정 알고리즘 적용결과 모든 고장조건에서 매우 정확하게 고장점 추정이 이루어짐을 알 수 있다.

그림 13은 모든 고장조건에서 고장저항별 평균오차율을 나타낸 것으로 각 오차율별 전체 평균 오차율은 0.935%를 보여 매우 우수한 고장점 추정 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이의 결과를 통해 본 논문에서 새롭게 개발한 고장점 추정 기법의 우수한 성능이 충분히 검증되었다. 무

엇보다 고장위상, 고장저항, 고장거리 등 모든 고장조건에 관계없이 정확한 고장점 추정이 가능하므로 다양한 실계통 조건에서 활용이 가능할 것으로 사료되며, 향후 지중송전계통의 신속한 고장대처에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

표 1 고장점 추정 결과(고장상 : A, 고장저항 : 0.1Ω)

Table 1 Results of fault location(Faulty phase : A, Fault resistance : 0.1Ω)

Fault condition		Faulty phase A, fault resistance 0.1Ω				
Fault inception angle	Fault point	n	$TA_{p1}(TB_{p1})$ [sec]	$TA_{p2}(TB_{p2})$ [sec]	Calculated distance [km]	Error [%]
30°	1km	1	0.013894	0.013905	0.921	1.257
	2km	3	0.013900	0.013925	2.093	1.479
	3km	3	0.013906	0.013940	3.182	2.896
	4km	4	0.013902	0.013929	4.022	0.350
	5km	2	0.013896	0.013912	4.944	0.891
45°	1km	1	0.014587	0.014599	1.005	0.079
	2km	2	0.014593	0.014618	2.093	1.479
	3km	3	0.014599	0.014636	3.098	1.559
	4km	2	0.014595	0.014622	4.022	0.350
	5km	1	0.014589	0.014604	5.027	0.429
60°	1km	1	0.015280	0.015292	1.005	0.079
	2km	2	0.015286	0.015311	2.093	1.479
	3km	3	0.015292	0.015329	3.098	1.559
	4km	2	0.015288	0.015315	4.022	0.350
	5km	1	0.015282	0.015297	5.027	0.429
90°	1km	1	0.016670	0.016678	0.921	1.257
	2km	1	0.016673	0.016697	2.009	0.143
	3km	2	0.016679	0.016715	3.014	0.222
	4km	2	0.016675	0.016702	4.022	0.350
	5km	1	0.016669	0.016683	5.111	1.766
Average Error[%]						0.920

표 2 고장점 추정 결과(고장상 : B, 고장저항 : 1Ω)

Table 2 Results of fault location(Faulty phase : B, Fault resistance : 1Ω)

Fault condition		Faulty phase B, fault resistance 1Ω				
Fault inception angle	Fault point	n	$TA_{p1}(TB_{p1})$ [sec]	$TA_{p2}(TB_{p2})$ [sec]	Calculated distance [km]	Error [%]
0°	1km	1	0.012507	0.012519	1.004	0.063
	2km	2	0.012513	0.012537	2.009	0.143
	3km	3	0.012519	0.012556	3.098	1.559
	4km	3	0.012514	0.012541	4.022	0.350
	5km	1	0.012509	0.012525	4.944	0.891
30°	1km	1	0.013894	0.013906	1.004	0.063
	2km	2	0.01390	0.013924	2.009	0.143
	3km	2	0.013906	0.013943	3.098	1.559
	4km	2	0.013901	0.013928	4.022	0.350
	5km	1	0.013896	0.013911	5.027	0.429
45°	1km	1	0.014587	0.014599	1.004	0.063
	2km	2	0.014593	0.014617	2.009	0.143
	3km	3	0.014599	0.014636	3.098	1.559
	4km	2	0.014594	0.014621	4.022	0.350
	5km	1	0.014589	0.014605	4.944	0.891
60°	1km	1	0.015280	0.015292	1.004	0.063
	2km	2	0.015286	0.015310	2.009	0.143
	3km	3	0.015292	0.015329	3.098	1.559
	4km	3	0.015287	0.015314	4.022	0.350
	5km	1	0.015282	0.015299	4.860	2.227
90°	1km	2	0.016670	0.016678	0.921	1.257
	2km	3	0.016673	0.016698	2.093	1.479
	3km	4	0.016679	0.016717	3.182	2.896
	4km	3	0.016675	0.016703	3.939	0.970
	5km	2	0.016669	0.016686	4.860	2.227
Average Error[%]						0.870

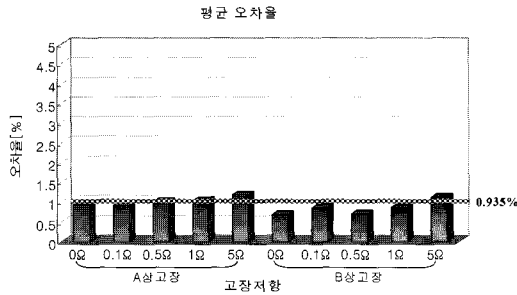


그림 13 평균 오차율 비교

Fig. 13 Comparison of average error rate

7. 결 론

논문에서는 지중송전계통 고장점추정을 위해 SWT와 진행과 원리를 이용하였으며, 웨이블릿 계수의 상호관계를 바탕으로 과도신호와 노이즈로부터 반사파를 판별하는 알고리즘을 이용해 고장구간을 판별하고 고장점을 추정하는 새로운 기법을 개발하였다. 본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 고장구간은 양단모선에서 측정된 신호에 1단계 필터링 과정을 거친 후 추출된 DI new1 신호의 시간간격을 이용해 판별된다.

2) 본 논문에서 개발한 고장점 추정 기법은 전체선로의 전반부와 후반부 고장구간 판별이 가능하며, 고장점에서 근접한 모선의 신호를 이용하기 때문에 케이블 감쇄에 의한 신호검출의 어려움이 없는 등 기존 판단정보 이용시에 나타나는 문제점을 개선하였다. 실제 고장거리계산은 판단 정보에 의해 개선되므로 기존 양단정보 이용시에 나타났던 시간 동기화에 따른 오차발생 가능성이 없을 뿐 아니라 기존 방법의 장점을 극대화하면서 단점은 개선한 새로운 고장점 추정 기법이다.

3) 고장점 추정기법은 전체 평균오차율이 0.935%로 매우 우수한 고장점 추정 성능을 보였으며, 특히 고장거리, 고장위상, 고장저항 등 고장조건에 관계없이 정확한 고장점 추정이 가능하므로 다양한 실제용 조건에서 활용될 수 있는 장점이 있다.

참 고 문 헌

[1] A. Abur, F. H. Magnago, "Use of Time Delays between Modal Components in Wavelet base Fault Location", *Electrical Power and Energy Systems*, No. 22, 2000

[2] W. Zhao, Y. H. Song, Y. Min, "Wavelet analysis based scheme for fault detection and classification in underground power cable system", *Electric Power System Research* 53(2000) 23-50

[3] Styvaktakis, E., Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H., "A Fault Location Technique Using High Frequency Fault Clearing Transients", *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 19 Issue 5, pp. 50-60, 1999. 5

[4] L. Shang, G. Herold, J. Jaeger, "A New Approach to High-Speed Protection for Transmission Line Based on Transient Signal Analysis Using Wavelets", *Development in Power System Protection, Conference Publication*, No. 479, 2001

[5] F. H. Magnago, A. Abur, "Fault Location Using Wavelets", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13 Issue 4, 1998. 10

[6] Kai Steinbrich, "Attenuation Behaviour of Single-core Power Cables", CIGRE-WG B1-05 session 20.06.03

[7] 정채균, 이종범, "웨이블릿을 이용한 지중송전계통 고장 검출 및 노이즈 제거 알고리즘 개발" 대한전기학회 논문지 제 56권 7호, 2007. 7

[8] The Math Works, "Wavelet Toolbox For Use with User's Guide Version 3, 2004

[9] X. H. Wang, R. S. H. Istepanian, Y. H. Song, "Microarray Image De-Noiseing Using Stationary Wavelet Transform", *Proc. of the 4th IEEE Conf. on Information Technology Applications*, 2003.

[10] X. H. Wang, "Characterization, detection and location of sheath fault on underground power transmission cables", *PhD Thesis*, Department of Electronic and Computer Engineering. Brunel University: London. 2001

저 자 소 개



정 채 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2006년~2007년 독일 University of Siegen, Post-doc 연구원. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 송전기술그룹 연구원
Tel : (042)865-7595
E-mail : chekyun@kepri.re.kr



이 종 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수.
Tel : (063)850-6735
E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr