

SWT를 이용한 지중송전계통의 고장검출 및 고장점 추정

정채균* 이종범
원광대

Fault Detection and Location using SWT on Underground Power Cable System

Chae-Kyun Jung* Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - In this paper, we are going to propose the new algorithms to detect, classify, discriminate the transient and the reflected signal from noise and thus discriminate the fault section and locate the fault accurately on underground power cable system. Actually, at this system, it's very difficult to discriminate the transient because of the reflected signal including many noises. Therefore, how to solve the noise interference is a big problem. In this paper, authors present a solution based on multiple scales correlation of the transient using stationary wavelet transform. It's simple, quick and straightforward. For applying all algorithms, we just use the signal captured in single end.

1. 서 론

지중송전케이블을 비롯한 전력계통에서 고장점추정을 위한 웨이브렛의 적용은 많은 연구진에 의해 그 장점이 입증되었으며 지금까지도 다각적으로 많은 연구가 진행되고 있다[1-5]. 특히, 고장점까지의 거리계산을 위해 고장점이나 반대 모선에서 반사되는 과도신호를 이용한 판단정보를 이용한 방법은 케이블 양 모선간의 정보교환이 필요 없기 때문에 더욱 실용적이며 양 모선간의 데이터 전송시 시간의 동기화에 의해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있으므로 더욱 정확성이 있고, 한 모선만의 시스템 구축으로 고장점 추정이 가능하기 때문에 매우 경제적이다.

그러나 케이블 계통의 고장점 추정을 위해 진행파를 이용하는 방법은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 특히, 고장점에서 반사되는 신호는 일부가 반대 모선방향으로 투과되기 때문에 측정모선으로 이르는 신호는 매우 약해지게 되며, 또한 이와 같은 과도신호는 가공선로와는 달리 케이블에서 감쇄가 크게 발생하므로 반사파의 신호는 더욱 약해질 수 있다. 따라서 케이블 과도현상에서 발생하는 노이즈의 레벨은 반사파의 레벨 보다 더욱 크게 나타날 수 있으므로 반사파 신호로부터 노이즈를 제거하는 필터의 개발은 케이블 고장점 추정에 있어 매우 중요한 부분이다. 또한 이러한 진행파 신호에 포함된 다량의 노이즈는 지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정과 고속 보호계전 알고리즘 개발에 많은 어려움을 주고 있다.

따라서 본 논문에서는 멀티스케일에서 웨이브렛 계수의 상호관계를 이용하여 과도신호와 노이즈로부터 반사파를 정확히 검출할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였고, 이의 신호를 분석하여 고장점까지의 거리를 계산하였다.

2. Stationary Wavelet Transform

SWT를 이용한 방법은 high pass 필터와 low pass 필터를 이용하여 각 레벨에 따라 분석할 수 있으며 이 과정은 DWT의 다운 샘플링과 같은 과정이 없으므로 원신호와 같은 길이를 가지게 된다. SWT의 이론은 다음과 같이 설명할 수 있다.

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 스캘링 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 스캘링 함수, 즉 low pass 필터이고, $C_{j,k}$ 는 2^j 에서 discrete approximation signal이다.

만약 $\psi(x)$ 가 웨이브렛 함수이면, 웨이브렛 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 스캘링 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 multiresolution 알고리즘이며, 이 변환에서는 다운 샘플링이 적용되므로 $f(x)$ 의 총 길이는 변환 후 1/2로 줄어들게 된다. 이 과정은 함수의 길이가 1이 될 때까지 반복된다.

그러나 SWT는 다운 샘플링 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.

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

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

3. 모델계통 및 고장점추정 알고리즘

3.1 모델계통

본 논문에서 검토한 지중송전계통은 154kV, OF 2000mm² 케이블이 전력구 방식으로 포설된 계통이며, 총 선로길이가 6.284km인 실제계통 모델이다. 또한 고장점 추정을 위한 샘플링 주파수는 1MHz이며, 지중케이블에서의 전파속도는 1.16702×10^8 km/sec, 고장발생 위상은 0도와 90도를 각각 적용하였다. 1선지락고장은 1km, 3km, 4km지점에서 발생시켰다.

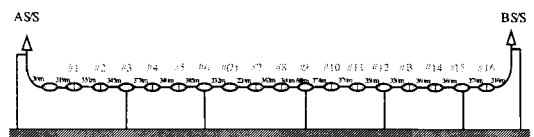


그림 1. 지중송전계통 모델

3.2 고장검출 알고리즘

일반적으로 웨이브렛 변환에서 1단계 detail 성분은 고장신호 검출에 주로 사용된다. 본 논문에서도 초기 고장검출을 위해 이와 같은 detail 신호를 이용하였다. detail 성분의 기준값을 설정하고 신호의 값이 이를 초과하면 고장으로 판별할 수 있는 것이다. 그러나 detail 신호가 가지고 있는 과도신호는 모든 상으로 유도되어 발생하므로 고장이 발생한 상을 판별하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 고장상 판별을 위해 low frequency 성분을 가지고 있는 웨이브렛의 approximation 신호를 이용하였다. 본 논문에서 적용한 고장검출 방법은 각상의 전류신호를 4단계 분해과정을 거친 후 얻어낸 approximation 신호를 사용하였다. 그림 2에 나타난 고장검출을 위한 흐름도에서처럼 1단계 detail 신호에 의해 고장이 검출되면 각상 전류의 4단계 분해를 통해 얻은 A_{d_j} 신호 중 가장 큰 최대값을 선정하고 이의 값과 각상의 최대값의 절대치를 비교하여 고장상을 판별하게 된다. 표 1의 고장 조건에 따른 고장판별 결과에서 보는 것처럼 고장 발생위상에 관계없이 고장이 발생한 상에서는 단위값(1.0)을 보이나, 나머지 두 상에서는 zero에 가까운 값을 보이게 된다.

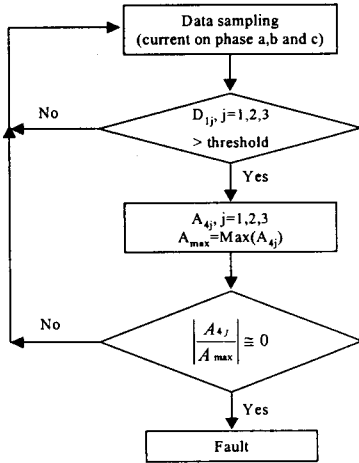


그림 2. 고장검출 흐름도

표 1. 고장검출 결과

고장조건		$\alpha=0^\circ$			$\alpha=90^\circ$		
		ra	rb	rc	ra	rb	rc
A	1km	1.000	0.0493	0.0482	1.000	0.0502	0.0463
	3km	1.000	0.0415	0.0340	1.000	0.0422	0.0331
	4km	1.000	0.0350	0.0827	1.000	0.0382	0.0340

3.3 과도신호 검출

그림 3은 1km 지점의 A상에서 1선지락고장 발생시 측정모션에서 추출된 고장상 전압파형에 대한 웨이브렛 3단계 분해과정을 통해 얻어낸 detail 성분의 신호를 나타내었다. 그림에서처럼 이의 신호에는 과도신호에 포함된 다량의 노이즈가 함유되어 있음을 알 수 있으며 0.0125초와 0.0127초의 샘플링 시간사이에 불규칙적인 피크점들이 여러곳에서 발생하고 있어 이는 고장점까지의 거리 계산에 심각한 오차 요인이 될 수 있다.

즉, 단순 웨이브렛 적용으로는 고장점에서 반사되는 과도신호를 원활히 검출할 수 없음을 보여준다. 또한, 실제 케이블 계통에서 발생하는 과도현상은 외부 환경적인 영향 등에 의한 간섭으로 높은 주파수의 노이즈가 발생되며, 그림 4에서처럼 단순 웨이브렛 변환으로는 고장발생에 의한 과도신호와 노이즈의 판별이 어려움을 알 수 있다. 이는 결국 정확한 고장점 추정에 심각한 영향을 미치며, 이와 같은 노이즈를 제거하는 방법은 진행파를 이용한 고장점 추정에 있어 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 노이즈 제거를 위한 해결 방안으로 고장 발생시 나타나는 과도신호에 대한 multi-scale 웨이브렛 분석을 통해 검출된 신호의 correlation을 이용하였다. 본 논문에서 제안한 direct multiplication을 이용한 스케일인 correlation에 의한 방법은 단순하면서도 정확하게 노이즈를 제거할 수 있다. 만약, 과도신호가 n레벨에서 웨이브렛에 의해 분해되면 detail의 계수는 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 이 된다. 여기서, 첫 번째와 두 번째

스케일에서의 detail 성분을 식 (9)와 같이 직접 곱하며, 최종적으로 식 (10)같은 correlation 방정식을 얻는다. 또한 이와 같은 correlation 방정식에 의해 첫 번째 detail 성분은 재 스케일 된다.

$$Corr = d_1 \times d_2 \quad (9)$$

$$Corr_{new} = Corr \times \sqrt{\frac{P_{d1}}{P_{Corr}}} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } P_{d1} = \sum d_1^2, P_{Corr} = \sum Corr^2$$

그 다음과정으로 correlation에 의해 생성된 새로운 과도신호인 $Corr_{new}$ 는 최초의 d_1 계수와와의 대소비교를 통해 새로운 detail 성분인 d_{1_new} 를 재 스케일하게 된다. 만약 이 단계에서 과도신호가 명확히 검출되면 알고리즘은 멈추게 된다. 그러나 d_{1_new} 단계에서 과도신호의 검출이 원활하지 않을 만큼 노이즈 함유량이 많은 경우에는 d_{1_new} 와 d_3 성분을 이용하여 식 (9)와 식 (10)의 과정을 다시 반복하고 새로운 d_1 의 성분을 재 스케일하며, 이와 같은 과정은 노이즈 성분이 완전히 제거될 때까지 반복된다.

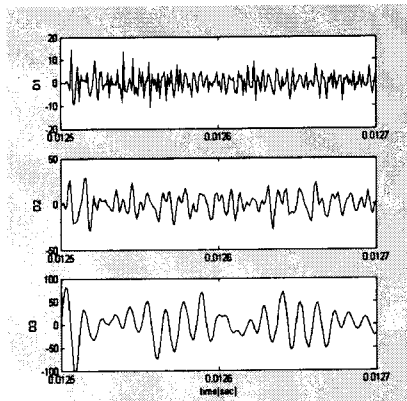


그림 3. 1km고장시 웨이브렛 변환의 3단계 Detail 성분

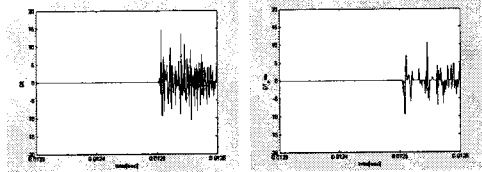


그림 4. 1km고장시 기존웨이브렛과 correlation과의 비교

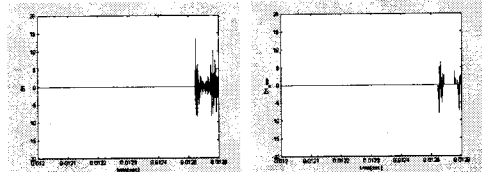


그림 5. 3km고장시 기존웨이브렛과 correlation과의 비교

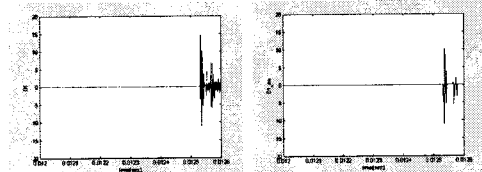


그림 6. 4km고장시 기존웨이브렛과 correlation과의 비교

그림 4 - 그림 6은 기존의 웨이브렛 변환과 multi-scale correlation을 바탕으로한 새로운 알고리즘을 이용한 detail 신호를 비교하여 나타내었다. 각 그림에서 왼쪽은 기존의 알고리즘을

이용한 결과이며, 오른쪽은 새로운 알고리즘을 적용한 결과를 보여준다. 각 그림에서 보는 것처럼, 노이즈는 현저히 필터링되며 모션에서 반사되는 과도신호 또한 쉽게 확인할 수 있다. 마지막 단계로 multi-scale correlation에 의해 처리된 신호의 최대값에 ±1의 펄스를 가하고 펄스가 가해진 신호를 제외한 나머지는 zero의 신호를 준다.

3.4 고장점 추정

고장점까지의 거리를 계산하기 전에 발생한 고장이 first half 인지 second half 구간인지를 먼저 판별해야 한다. first half 구간 고장의 경우에는 A모션에서 첫 번째 반사가 일어난 후 접속점에서 반사되는 신호보다 고장점에서 반사되는 신호가 모션에 먼저 도달하게 된다. 한편 second half 구간 고장의 경우에는 모션에서 첫 번째 신호의 반사 후 고장점 보다 접속점에서 반사되는 신호가 먼저 A모션에 도달하게 되는 특성을 가지고 있다. 따라서 발생한 고장이 선로의 중간점 이전인지 혹은 이후인지를 먼저 판별하고 A모션에 도달하는 진행파의 첫 번째와 두 번째 사이의 시간 간격을 측정하여 각각 고장점까지의 거리를 계산하여야 한다. 그림 7에서는 고장점까지의 거리를 계산하는 모든 과정의 흐름도를 나타내었다.

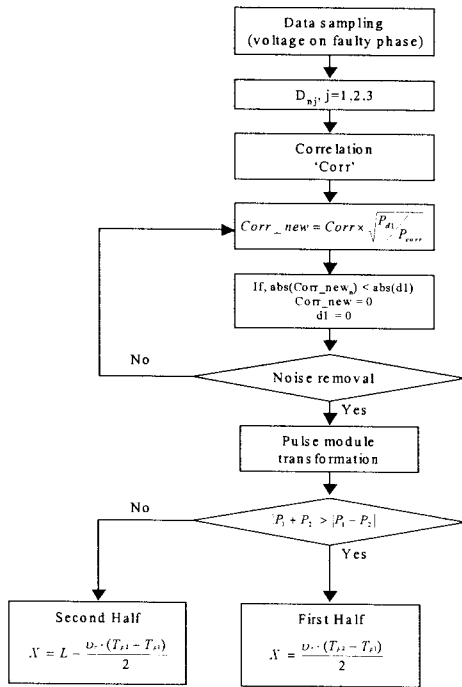


그림 7. 고장점 추정 흐름도

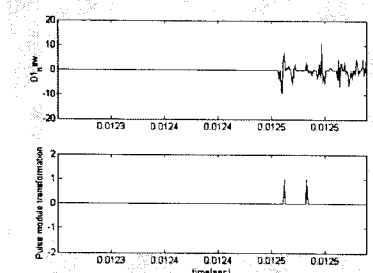


그림 8. 1km 고장시 new detail과 pulse transformation

그림 8에서는 1km 지점에서 고장발생시 재 스케일 후의 새로운 detail과 펄스 변환 신호를 나타내었다. 그림에서처럼 첫 번째와 두 번째 펄스의 극성이 동일극성이므로 고장이 first half 구간에서 발생한 것을 알 수 있으며, 고장점까지의 거리는 식 (11)과 같이 계산된다.

$$X = \frac{1.16702 \times 10^5 \times [(12.533 - 12.512) \times 10^{-3}]}{2} = 1.22 [km] \quad (11)$$

또한, 3km 고장시에도 동일한 방법으로 고장점까지의 거리 계산하면 식 (12)와 같다.

$$X = \frac{1.16702 \times 10^5 \times [(12.578 - 12.528) \times 10^{-3}]}{2} = 2.92 [km] \quad (12)$$

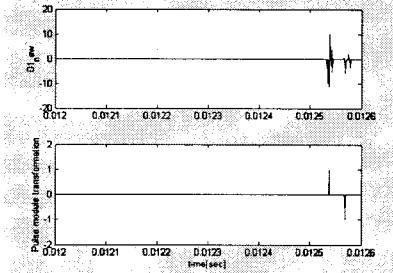


그림 9. 4km 고장시 new detail과 pulse transformation

그림 9는 4km 지점에서 고장발생시 재 스케일 후의 새로운 detail과 펄스 변환 신호를 나타내었다. 그림에서처럼 첫 번째와 두 번째 펄스의 극성이 서로 다른 극성이므로 고장이 second half 구간에서 발생한 것을 알 수 있으며, 고장점까지의 거리는 식 (13)과 같이 계산된다.

$$X = 6.284 - \frac{1.16702 \times 10^5 \times [(12.569 - 12.538) \times 10^{-3}]}{2} = 4.4 [km] \quad (13)$$

4. 결 론

지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정은 가공선로와는 달리 높은 고조파 노이즈의 영향으로 정확한 신호를 검출하는데 매우 많은 어려움이 있었으며 이는 진행파를 이용한 지중송전계통 고장점 추정에 심각한 장애요소로 작용하였다. 본 논문에서는 먼저 detail과 approximation 신호를 이용하여 고장 검출 및 고장상 판별을 하였으며, 고장상의 전압신호를 이용해 SWT 3단계 분해과정을 거친 후 추출된 detail 신호를 적용한 correlation 알고리즘과 이를 재 스케일 함으로써 노이즈가 제거된 새로운 new detail 성분을 얻을 수 있는 과도신호 판별 알고리즘을 제안하였고, 알고리즘의 사례분석을 통해 노이즈 제거 효과가 우수함을 검증하였다. 또한 노이즈가 제거된 신호에 펄스 신호를 발생시켜 반사점을 더욱 명확히 확인할 수 있게 하였으며 이의 신호를 이용하여 고장구간 판별 및 고장점까지의 거리를 더욱 쉽게 계산할 수 있도록 하였다. 본 논문의 결과는 지중송전계통에서도 신속하고 정확한 실시간 고장점 추정이 가능함을 보인 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-274) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- Magnago, F.H., Abur, A., "Fault location using wavelets", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 13, Oct 1998
- 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 May 1999
- Tawfik, M.M., Morcos, M.M., "A novel approach for fault location on transmission lines", IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, Nov 1998,
- Gaouda, A.M., Kanoun, S.H., Salama, M.M.A., Chikhani, A.Y., "Generation, Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement", Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, Vol. 149, May 2002
- Chae-Kyun Jung, Jong Beom Lee, Yang-Woung Yoon, "A Study on the Fault Location Algorithm Using Wavelet Transform in Combined Transmission Systems", Tans. KIEE, Vol. 51A, No. 5, May 2002