

Multiscale Correlation을 이용한 지중송전계통 고장점 추정에 관한 연구

정채균\* 이종범\* 강지원\*\*  
원광대\* KEPRI\*\*

A Study on the Fault Location Using Multiscale Correlation  
in Underground Power Cable Systems

Chae-Kyun Jung\* Jong-Beom Lee\* Ji-Won Kang\*\*  
Wonkwang University\* KEPRI\*\*

**Abstract** - The study of applying wavelet transform in power cable system fault location has been recognized by many researchers and investigated. For performance of fault location, the fault generated transients can be captured at one end of the cable or both ends. Between two approaches, single-ended approach is less expensive and more reliable as it doesn't need communication link between the ends of the cable. So, we performs the approach based on the one. In this paper, we are going to introduce a new algorithm to discriminate the transient and the reflected signal using wavelet coefficient. For wavelet transform, the stationary wavelet transform(SWT) is applied instead of conventional DWT because SWT has redundancy properties which is more useful in noisy signal processing.

1. 서 론

전력계통에서 웨이블릿 변환을 이용한 고장점 추정에 관한 연구는 지금까지 많은 연구진에 의해 그의 장점이 입증되었으며 현재에도 실시간 고장판별과 고장점 추정을 위해 다각적으로 연구가 진행되고 있다[1-5]. 웨이블릿 변환은 고장으로 인해 발생하는 과도신호를 시간과 주파수의 두 영역에서 검출할 수 있는 장점이 있으며, 특히 시간영역에서 분석이 가능하기 때문에 고장점 추정의 적용에 매우 유리한 특성을 가지고 있다. 지중송전계통에서 고장 발생시, 과도신호는 케이블의 편단 또는 양단에서 검출이 가능하디[1-3]. 그러나 이들 두 방법에서 편단정보를 이용한 방법은 케이블 양 모션간의 정보교환이 필요 없기 때문에 더욱 실용적이며, 양 모션간의 데이터 전송시 시간의 동기화에 의해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있으므로 더욱 정확성이 있고, 단지 한 모션의 시스템 구축으로 고장점 추정이 가능하기 때문에 매우 경제적이다.

편단정보를 이용하는 방법은 고장점까지의 거리 계산을 위해 고장점이나 반대 모션에서 반사되는 과도신호를 이용한다. 특히, 고장점에서 반사되는 신호는 신호의 일부가 반대 모션방향으로 투과되기 때문에 측정모션으로 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 계통의 고장점 추정에 있어 매우 중요한 부분이다. 또한 이러한 진행과 신호에 포함된 다량의 노이즈는 지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정과 고속 보호계 전압고리측 개발에 많은 어려움을 주고 있다.

따라서 본 논문에서는 과도신호와 노이즈로부터 반사파를 판별하기 위한 새로운 알고리즘을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 멀티스케일에서 웨이블릿 계수의 상관관계를 바탕으로 한 것이며, 기존의 DWT(discrete wavelet transform)에 비해 노이즈 신호처리에 더욱 유리한 특성을 가지고 있는 SWT(stationary wavelet transform)를 적용하였다. 또한 실시간 고장점 추정을 위해 DAQ(data aquisition system)와 신호의 샘플링, 웨이블릿 변환 분석 시간 등이 실시간으로 고려된다.

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 j에서 설정된다고 가정하면 이는 스펙트럼 함수  $\phi(x)$ 를 가지는

$f(x)$ 의 스칼라 성분  $C_{j,k}$ 에 의해 정의된다.

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

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

여기서,  $\phi(x)$ 는 스펙트럼 함수, 즉 low pass 필터이고,  $C_{j,k}$ 는  $2^j$ 에서 discrete approximation signal이다.

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

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

여기서,  $w_{j,k}$ 는  $2^j$ 에서 discrete detail signal이다.

$C_{j,k}$ 에서 스펙트럼 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.

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

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

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

$$w_{j+1,k} = \sum_n g(n-2k)C_{j,n} \tag{6}$$

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 때 까지 반복된다.

그러나 SWT는 다운 샘플링 대신에 컨볼루션 수행 전에 각 스케일에서 unsampling 과정이 선행되며, 스케일 j에서 그 다음 단계인  $C_{j+1,k}$  까지 2의 factor에 의해 증가하는 샘플링사이의 거리는 식 (7)과 같고, DWT에서는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$w_{j+1,k} = \sum_l g(l)C_{j,k+2^j l} \tag{8}$$

3. SWT를 이용한 신호 검출

본 논문에서 검토한 지중송전계통은 154kV, OF 2000mm<sup>2</sup> 케이블이 전력구 방식으로 포설된 계통이며, 총 선로길이가 6.28km인 실제용 모델이다. 또한 고장점 추정을 위해 1선지락고장은 근거리인 1km 지점에서 발생시켰으며 고장신호 검출을 위한 샘플링 주파수는 1MHz를 적용하였다.

그림 1은 1km지점의 A상에서 1선지락고장 발생시 측정모션에서 추출된 고장 상 전압파형을 나타내었다. 또한 그림 2에서는 SWT를 적용하여 3단계 분해과정을 통해 얻어낸 detail 성분의 신호를 나타내었다. 그림 2의 1단계 detail 성분(d1)에 표시된

화살표는 고장발생으로 인해 측정모선에서 검출된 과도신호와 고장점에서 반사되어 측정모선에 도달한 과도신호를 보여준다. 그림에서처럼 고조파 함유량이 적은 경우에는 반사되는 신호의 판별이 가능하며 2단계와 3단계 분석 결과를 통해 피크점을 비교적 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 0.0125초와 0.0127초 사이에 검출된 신호에서 알 수 있듯이 과도신호에 포함된 노이즈의 영향으로 샘플 시간 사이에 많은 피크점들이 발생하고 있으며 이는 정확한 신호 검출과 고장점까지의 거리계산에 심각한 오차의 요인이 될 수 있다.

그림 3은 90도 고장의 경우에 추출된 고장 상 전압파형이다. 그림에서처럼 고장신호에 포함된 노이즈가 그림 1에 비해 많이 함유되어 있으며, 이 경우 SWT를 이용한 3단계 분해과정을 거친 후에도 샘플링 시간 사이에 불규칙적인 피크점이 여러 지점에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

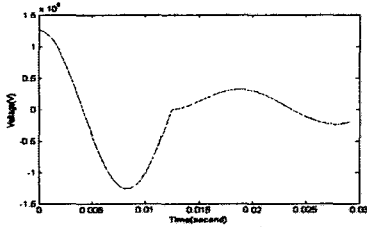


그림 1. 1km 고장시 고장상 전압파형(0도)

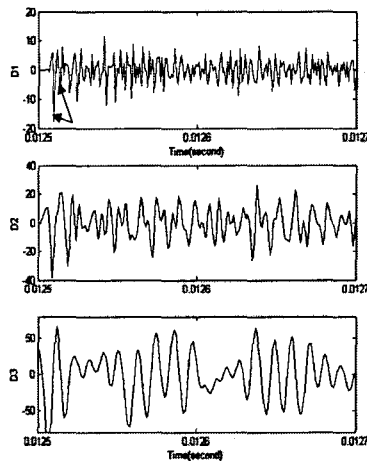


그림 2. 웨이블릿 변환의 3단계 Detail 성분

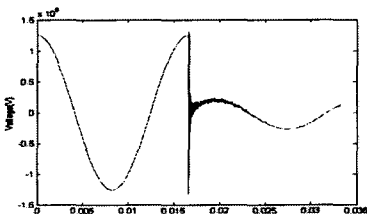


그림 3. 1km 고장시 고장상 전압파형(90도)

즉, 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 웨이블릿 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 multiscale 웨이블릿 분석을 통해 검출된 신호의 correlation을 이용하였다.

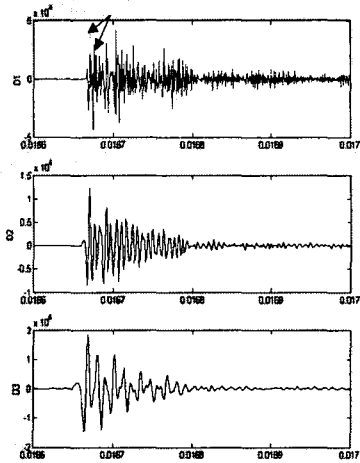


그림 4. 웨이블릿 변환의 3단계 Detail 성분

#### 4. 과도신호 판별 알고리즘

3절에서 언급한 것처럼 단순 웨이블릿 적용에 의한 과도신호의 판별은 매우 어렵다. 그러나, 3단계 분석을 통해 알 수 있는 것처럼 일부의 과도신호는 상대적으로 감소하는 반면 일부의 신호는 명백히 높은 값을 보임을 알 수 있다. 즉, 두 최대값이 동일한 maxima line에 포함되면 스케일 2'에서의 최대값은 2<sup>2+1</sup>에서 또 다른 최대값까지 진행한다는 것을 발견하였다. 또한, 일반적으로 노이즈가 포함된 maxima의 수는 스케일이 증가할 때 점점 감소된다.

본 논문에서 과도신호 판별을 위해 제안한 알고리즘은 direct multiplication을 이용한 스케일의 correlation에 의한 것이다. 이것은 단순하면서도 정확하게 노이즈를 제거할 수 있다. 만약, 과도신호가 n레벨에서 웨이블릿에 의해 분해되면 detail의 계수는 d1, d2, d3, ..., dn이 된다. 여기서, 첫 번째와 두 번째 스케일의 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\_new는 최초의 d1계수와와의 대소비교를 통해 새로운 detail 성분인 d1\_new를 재 스케일하게 된다. 만약 이 단계에서 과도신호가 명확히 검출되면 알고리즘은 멈추게 된다. 그러나 d1\_new단계에서 과도신호의 검출이 원활하지 않을 만큼 노이즈 함유량이 많은 경우에는 d1\_new와 d3 성분을 이용하여 식 (9)와 식 (10)의 과정을 다시 반복하고 새로운 d1의 성분을 재 스케일하며, 이와 같은 과정은 노이즈 성분이 완전히 제거될 때 까지 반복된다.

#### 5. 시뮬레이션 결과

그림 2와 그림 4에서처럼 1선지락고장 발생시 측정모선에서 샘플링된 과도신호를 SWT의 3단계 분해과정을 통해 분석한 결과 다량의 노이즈가 잔재하여 정확한 고장점까지의 거리계산이 어려움을 알 수 있었다. 이는 그림 6과 그림 9를 통해서도 확인할 수 있다. 따라서 본 절에서는 4절에서 제안한 과도신호 판별 알고리즘을 적용하여 노이즈 제거 효과를 검증하였고, 측정모선에서 반사되는 과도신호를 정확히 판별할 수 있음을 보였다.

그림 5는 1km 0도 고장시, SWT의 3단계 분석을 통해 추출된 d1계수와 correlation 알고리즘을 적용해 얻은 신호를 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 멀티스케일 correlation 알고리즘을 적용한 corr\_new 신호에는 노이즈가 저감함을 알 수 있으며, d1과 corr\_new 신호의 대소 비교를 통해 재 스케일된 d1\_new 신호에

서는 그림 7에서처럼 노이즈가 더욱 제거되어 반사되는 과도신호를 명확히 판별할 수 있음을 확인하였다. 그림 6과 그림 7은 각각  $d1$ 과  $d1\_new$ 의 신호를 제공하여 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 다량의 노이즈가 포함된 그림 6과는 달리 케이블의 전파속도는 일정한 값이므로 그림 7의 첫 번째와 두 번째 신호의 시간간격을 통해 고장점까지의 거리는 간단하고 정확하게 계산된다.

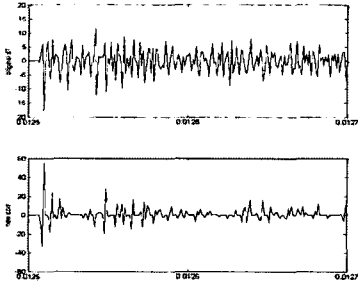


그림 5. 1km 고장시 correlation 알고리즘 적용(0도)

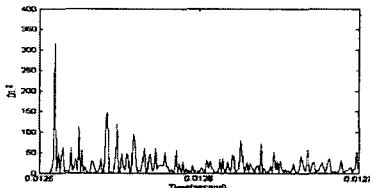


그림 6. 1km 고장시 original signal의  $d_1^2(0도)$

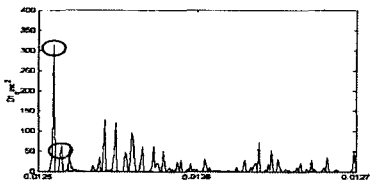


그림 7. 1km 고장시 correlation signal의  $d_{1new}^2(0도)$

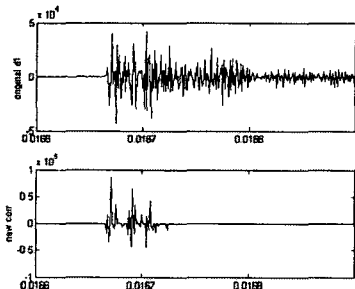


그림 8. 1km 고장시 correlation 알고리즘 적용(90도)

노이즈의 함유량이 많은 1km 90도 고장시, SWT 분석결과  $d1$  계수로는 그림 9에서처럼 신호검출이 매우 어려움을 알 수 있다. 그림 8은  $d1$ 계수와 correlation 알고리즘을 적용해 얻은 신호를 비교하여 나타내었으며  $corr\_new$  신호에는 마찬가지로 노이즈가 상당히 저감함을 알 수 있다. 그리고  $d1$ 과  $corr\_new$  신호의 대소 비교를 통해 재 스케일 된  $d1\_new$  신호에서는 그림 10에서처럼 노이즈가 더욱 제거된다. 그러나 그림에서처럼 모션에서 반사되는 고장신호를 판별하기에는 다소 애매함을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 경우 알고리즘은  $corr\_new$ 와  $d3$  계수를 이용하여 위의 과정을 한번더 반복하게 된다. 이를 통해 그림 11과 같은  $d1\_new2$  신호를 얻을 수 있으며 모션에서 반사되는 과도신호는 더욱 명확히 판별되고, 첫 번째와 두 번째 신호의 시간간격을 통해 고장점까지의 거리를 간단하고 정확하게 계산할 수 있다.

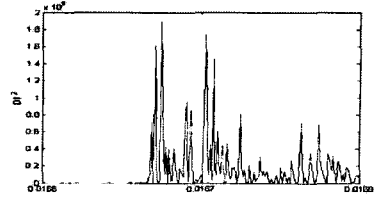


그림 9. 1km 고장시 original signal의  $d_1^2(90도)$

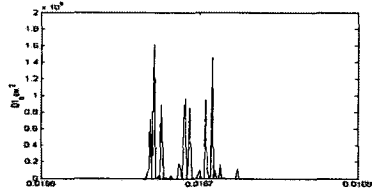


그림 10. 1km 고장시 correlation signal의  $d_{1new}^2(90도)$

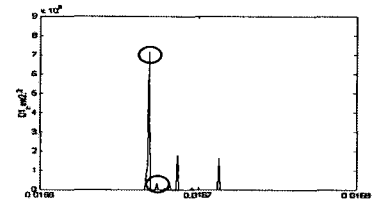


그림 11. 1km 고장시 correlation signal의  $d_{1new2}^2(90도)$

## 6. 결론

지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정 은 가공선로와는 달리 높은 고조파와 노이즈의 영향으로 정확한 신호를 검출하는데 매우 많은 어려움이 있었으며 이는 진행파를 이용한 지중송전계통 고장점 추정에 심각한 장애요소로 작용하였다. 따라서 본 논문에서는 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. 이는 지중송전계통에서도 신속하고 정확한 실시간 고장점 추정이 가능함을 보였다.

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

## [참고 문헌]

1. Magnago, F.H., Abur, A., "Fault location using wavelets", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 13, Oct 1998
2. 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
3. Tawfik, M.M., Morcos, M.M., "A novel approach for fault location on transmission lines", IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, Nov 1998
4. 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
5. Chae-Kyun Jung, Jong-Beom Lee, Yang-Woong Yoon, "A Study on the Fault Location Algorithm Using Wavelet Transform in Combined Transmission Systems", Tans. KIEE, Vol. 51A, No. 5, May 2002