

지중송전계통 고장점 추정을 위한 노이즈 제거 기법 개발

정 채 균* 이 증 범
원광대

Development of Noise Cancellation Technique for Fault Location on Underground Power Cable System

Chae-Kyun Jung* Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - Actually, it's very difficult to discriminate the transient on underground power cable system because of the reflected signal including many noises. Therefore, in this paper, a solution based on multiple scales correlation of the transient using SWT(Stationary Wavelet Transform) is presented. It's quick and straightforward. For applying all algorithms, we just use the signal captured in single end.

1. 서 론

최근 도시의 인구집중현상의 심화에 따른 전력수요의 밀도가 대 도시를 중심으로 급격히 높아짐에 따라 도시의 지중송전 필요성이 날이 갈수록 증대되고 있으며, 인구밀집지역내의 가공송전이 가지고 있는 한계 때문에 지중송전계통의 도입이 점차 증대되고 있다. 또한 지중선로는 지하 전력구 및 관로 등을 이용해 포설되므로 사고발생빈도는 가공선로에 비해 일반적으로 낮으나 과도현상이 발생하면 연구사고로 진행될 가능성이 높고 사고 복구에도 장시간이 소요되어 그 파급효과는 가공선로에 비해 크게 나타나고 있다. 따라서 새로운 지중송전계통 보호기법 및 고장점검출 및 고장거리 판별에 관심이 날이 갈수록 증대되고 있는 추세이다. 특히, 지중송전계통을 비롯한 전력계통에서 고장점 추정을 위한 진행파 및 웨이브렛 적용 기법은 이미 많은 연구진에 의해 그 장점이 입증되어 왔다 [1-5].

웨이브렛 변환 기법은 고장점 추정에서 시간과 주파수의 두 영역에서 신호를 분석할 수 있어 고장 발생시 과도신호 검출 및 진행파 이론을 적용할 수 있는 등 매우 유리한 장점을 가지고 있다. 진행파를 이용하는 방법은 고장현상이 매우 복잡하고, 고장상태에 따라 불규칙적으로 변화하는 영상분 임피던스 및 절연통보호장치(SVL) 등 보호설비에 따라 많은 특성변화가 발생하는 지중송전계통에서 이와 같은 영향을 최소화 할 수 있기 때문에 정확하고 신속한 고장점 추정이 가능한 방법 중 하나이다. 그러나 지중송전계통에서 발생하는 과도신호에는 다량의 노이즈가 포함되어 있으며, 고주파 과도신호는 케이블에서 매우 높은 감쇄를 보이기 때문에 반사파의 신호는 약해지고 측정시 반사파보다 높은 레벨의 노이즈가 나타날 수 있다. 따라서 반사파 신호로부터 노이즈를 제거할 수 있는 기법의 개발은 케이블 고장점 추정에 있어 매우 중요한 부분이다. 이러한 이유로 지금까지 지중송전계통에서 진행파를 적용한 고장점 추정 연구사태가 거의 없었으며 정확한 고장점 추정을 위해 반드시 해결해야 될 필요성이 제기되어 왔다.

따라서 본 논문에서는 웨이브렛 변환(SWT)의 Multi-Scale Correlation을 이용해 과도신호로부터 노이즈를 단계적으로 제거하여 반사파 신호를 정확히 검출 할 있는 새로운 기법을 개발하였으며, 실제통 모델의 고장분석을 통해 이를 검증하였다.

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[6, 7].

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 스켈링 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 스켈링 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.

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

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

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

식 (5)와 식 (6)은 기존의 DWT 변환의 multiresolution 알고리즘이며, 이 변환에서는 다운 샘플링이 적용되므로 $f(x)$ 의 총길이는 변환 후 1/2로 줄어들게 된다. 이 과정은 함수의 길이가 1이 될 때까지 반복된다.

그러나 SWT는 다운 샘플링 대신에 컨벌루션 수행 전에 각 스케일에서 downsampling 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.

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

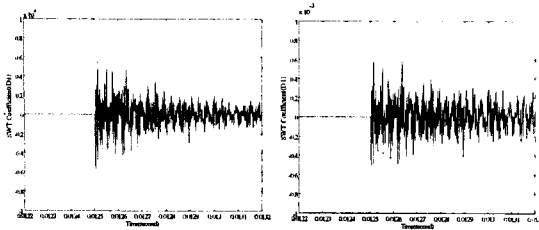
$$\omega_{j+1,k} = \sum_l g(l)C_{j,k+2l} \tag{8}$$

3. 모델계통

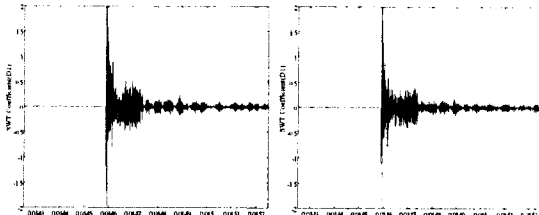
본 논문에서 검토한 지중송전계통은 154kV, XLPE 케이블이 전력구 방식으로 포설된 계통이며, 총 선로길이가 6.284km인 실제통 모델이다. 또한 고장점 추정을 위한 샘플링 주파수는 1MHz이며, 지중케이블에서의 전파속도는 1.67487×10^8 km/sec, 고장발생 위상은 0도, 45도, 90도를 각각 적용하였다. 1선지락고장은 1km, 2km, 3km지점에서 발생시켰으며, 고장저항은 0Ω, 0.5Ω, 1Ω을 적용하였다.

4. 노이즈 제거 기법

1선지락고장이 1km와 2km에서 발생한 경우 각 고장저항에 따라 웨이브렛 변환의 1단계 Detail(D1) 성분을 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 그림에서처럼, 다량의 노이즈가 포함된 과도신호 때문에 불규칙적인 많은 피크점이 여러 곳에서 나타나고 있어 고장판별 및 고장점 추정이 불가능함을 알 수 있다.



(a) 고장저항 : 0Ω (b) 고장저항 : 0.5Ω
 그림 1. 1km 고장시 웨이브렛 변환의 D1 파형(고장위상:0도)



(a) 고장저항 : 0.5Ω (b) 고장저항 : 1Ω
 그림 2. 2km 고장시 웨이브렛 변환의 D1 파형(고장위상:90도)

본 논문에서는 노이즈 제거를 위한 해결 방안으로 고장발생시 나타나는 과도신호에 대한 Multi-Scale 웨이브렛 분석을 통해 검출된 신호의 correlation을 이용하였다. 본 논문에서 제안한 direct multiplication을 이용한 스케일의 correlation에 의한 방법은 단순하면서도 정확하게 노이즈를 제거할 수 있다. 만약, 과도신호가 n 레벨에서 웨이브렛에 의해 분해되면 Detail의 계수는 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ 이 된다. 여기서, 첫 번째와 두 번째 스케일에서의 Detail 성분은 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.

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

$$Corr\ new1 = corr1 \times \sqrt{\frac{P_{D1}}{P_{Corr1}}} \times 2^n \quad (10)$$

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.

$$Corr2 = Corr\ new1 \times D_3 \quad (11)$$

$$Corr\ new2 = corr2 \times \sqrt{\frac{P_{Corr\ new1}}{P_{Corr2}}} \times 2^n \quad (12)$$

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

$$Corr3 = Corr\ new2 \times D_4 \quad (13)$$

$$Corr\ new3 = corr3 \times \sqrt{\frac{P_{Corr\ new2}}{P_{Corr3}}} \times 2^n \quad (14)$$

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

그림 3에서는 모든 알고리즘의 과정을 플로우 차트로 나타내었다.

5. 시뮬레이션 결과

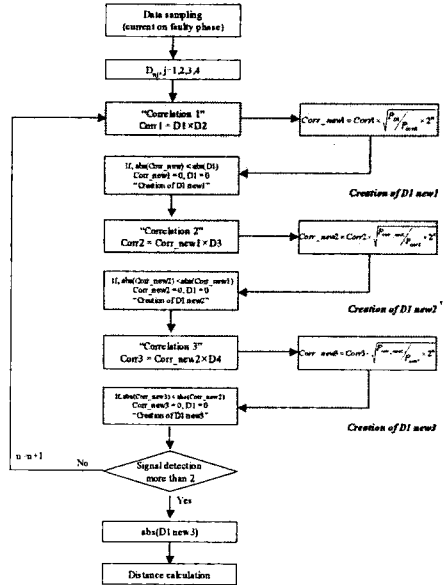
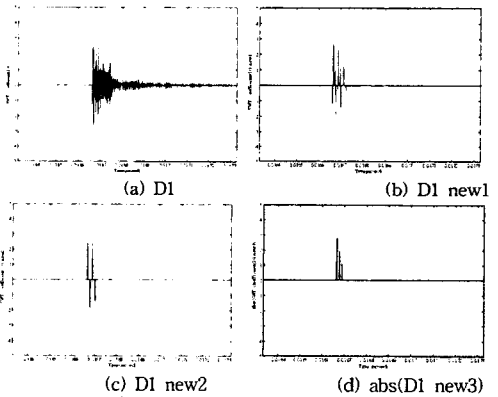
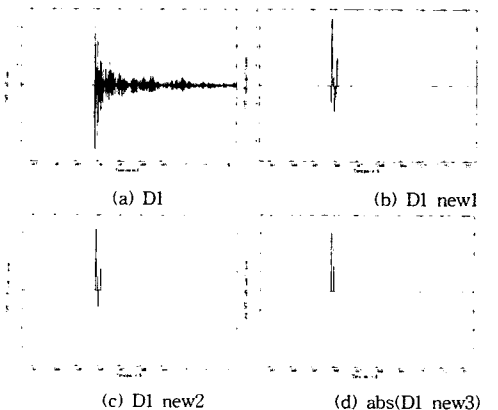


그림 3. 고장점 추정위한 노이즈 제거 기법의 플로우 차트



(a) D1 (b) D1 new1
 (c) D1 new2 (d) abs(D1 new3)
 그림 4. 1km 고장시 노이즈 제거과정 (고장저항:0, 고장위상:90도, n=1)



(a) D1 (b) D1 new1
 (c) D1 new2 (d) abs(D1 new3)
 그림 5. 1km 고장시 노이즈 제거과정 (고장저항:0.5, 고장위상:45도, n=1)

그림 4와 그림 5는 1km 고장시 고장저항 및 위상에 따른 노이즈 제거 과정을 나타내었다. 그림에서처럼 첫 번째 Detail 성분인 D1에서는 고장점 추정이 어려울 수 있다. 그러나, D1 new1과 D1 new2의 과정은 거치면서 노이즈는 현저히 저하되며 D1 new3 신호를 통해 첫 번째와 두 번째 반사시간을 정확히 검출할 수 있다. 그림 4에서 각각 진행과 도달시간은 0.016667초와

0.016678초로 검출되었으며 진행파 속도 1.67487×10^8 km/sec를 적용해 고장거리를 계산한 결과 0.921km로 실제거리와 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 고장저항이 0.5 이고 고장위상이 45도인 그림 5의 경우에도 첫 번째와 두 번째 진행파 도달시간은 각각 0.014587초와 0.014599초로 검출되어 고장점까지의 계산 거리는 1.005km로 매우 정확함을 확인할 수 있었다.

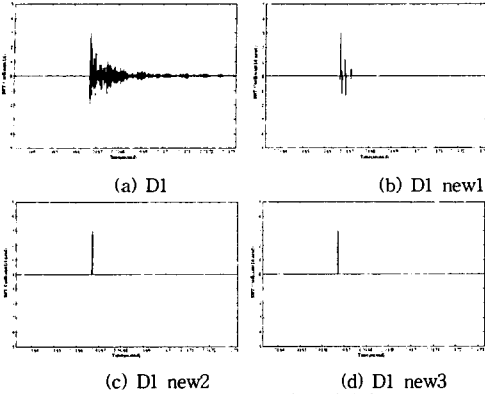


그림 6. 2km 고장시 노이즈 제거과정
(고장저항:0.5, 고장위상:90도, n=1)

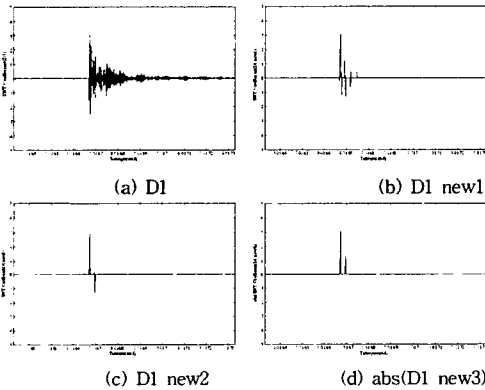


그림 7. 2km 고장시 노이즈 제거과정
(고장저항:0.5, 고장위상:90도, n=2)

고장저항이 0.5이고 고장위상이 90도인 2km 고장의 경우, 그림 6에서처럼 첫 번째 알고리즘 과정(n=1)에서 D1 new2와 D1 new3에 단지 하나의 신호만 검출 되었다. 이 경우에는 알고리즘은 자동적으로 다음 차수(n=2)에서 다시 한번 반복되어 그림 7과 같은 신호를 얻게 된다. 그림 7의 D1 new3에서 검출된 도달시간은 각각 0.016673초와 0.016697초로 계산거리는 2.009km이다.

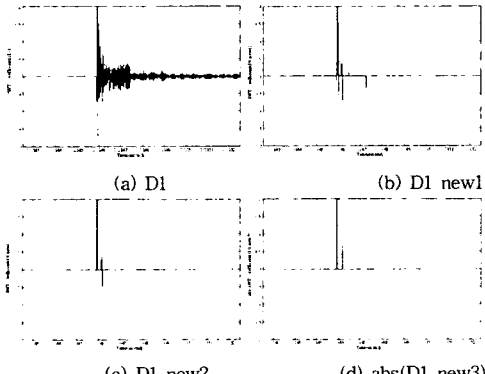


그림 8. 2km 고장시 노이즈 제거과정
(고장저항:1, 고장위상:45도, n=3)

그림 8과 그림 9는 고장이 각각 2km와 3km에서 발생했을 때

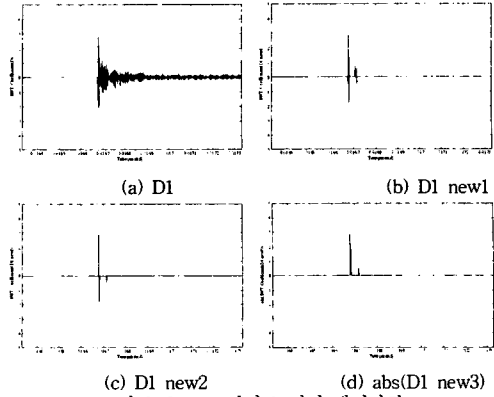


그림 9. 3km 고장시 노이즈 제거과정
(고장저항:0.5, 고장위상:90도, n=2)

노이즈 제거과정을 보여준다. 여기에서 고장점 추정을 위한 적절한 신호는 각각 3번째 차수(n=3)와 두 번째 차수(n=2)에서 얻어짐을 알 수 있다. 그림 8에서의 진행파 도달시간은 0.014593초와 0.014618초로 계산거리는 2.093km이며, 그림 9에서는 0.016679초와 0.016715초로 계산거리는 3.014km이다.

그림 4 - 그림 9에서처럼, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 노이즈는 현저히 저감됨을 보였고, 이 외의 고장 케이스들에서도 고장저항 및 고장위상에 관계없이 새로운 노이즈 제거기법을 이용해 고장점까지의 거리가 정확히 계산됨을 확인하였다.

6. 결 론

지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정에는 가공선로와는 달리 높은 고조파와 노이즈의 영향으로 정확한 신호를 검출하는데 매우 많은 어려움을 겪어 왔으며 이는 진행파를 이용한 지중송전계통 고장점 추정에 심각한 장애요소로 작용하였다. 따라서 본 논문에서는 과도신호의 SWT 분해과정을 거친 후 추출된 Detail 신호와 이를 적용한 correlation을 이용한 새로운 노이즈 제거 기법을 제안하였고, 알고리즘의 사례분석을 통해 노이즈 제거 효과가 우수함을 검증하였으며 이의 신호를 이용하여 고장점까지의 거리가 정확하게 계산됨을 확인하였다. 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
- X. H. Wang, R. S. H. Istepanian, Y. H. Song, "Micro array Image De Noising Using Stationary Wavelet Transform", Proc of the 4th IEEE Conf on Information Technology Applications, 2003.
- Hao Ye, Guizeng Wang, Steven X. Ding, "A New Fault Detection Approach Based on Parity Relation and Stationary Wavelet Transform", IEEE Proceeding of the American Control Conference, 2003.