

## 웨이브렛 변환을 이용한 고저항 사고 검출

정영식\*, 김동욱\*\*  
인천대학교\*, 전기안전연구원\*\*

### High Impedance Fault Detection Based on Wavelet Transform

Young-Sik Chung\*, Dong-Wook Kim\*\*  
University of Incheon\*, Korea Electrical Safety Corporation\*\*

**Abstract** - A method for high impedance fault(HIF) detection based on wavelet transform is presented in this paper. HIF is detected and classified by obtaining the energy distribution curve from the wavelet coefficients at each level. The energy distribution of each transient disturbance has unique deviation from sinusoidal wave in particular energy level, which is adopted to provide reliable classification of the type of transient.

#### 1. 서 론

제조 산업에서 발생하는 주요문제들의 하나는 통상의 과도현상과 별개의 고저항(high-impedance) 과도현상에 의한 전기 공급원에서의 외란이다. 일반적으로 고저항 과도현상은 보편적인 보호 장치가 동작하기 위한 충분한 전류를 끌어낼 수 없으므로, 고저항 사고(high-impedance fault, HIF)는 오늘날 전력분배 시스템에서 어려운 보호문제들의 하나이다. HIF는 상공에 달린 도선이 끊어져 아스팔트길, 모래, 시멘트, 풀 또는 나무에 떨어졌을 때 발생된다. 활성화된 고전압 선에서 이러한 사고가 발생되면 고전압 선은 사람에게 영향을 미칠 수 있는 거리에 떨어질 수 있다. 또한 이러한 사고는 종종 아크현상을 동반하며, 화재의 위험이 존재한다. 따라서 공공의 안전과 동작의 신뢰성 관점에서 고저항 과도현상의 검출은 매우 중요하다. 그러나 HIF는 영향을 받은 선로에서 전류의 급격한 변화가 발생하지 않으므로 일반적인 과전류 보호장치를 통해 검출하기가 어렵다.

배전망에서 HIF는 주기적 형태와 외란을 갖는 비선형 특성을 갖고 있다. 따라서 HIF 검출은 대부분 HIF에 관련된 전압과 전류 패턴에서 특정 특성을 식별하는 것이다. 일반적으로 식별은 신호 처리 기법들을 활용한 특징 추출과 패턴 인식 및 분류의 두 가지 기본 단계들을 결합한다.

최근에 프랙탈 기법, 전문가 시스템, 신경회로망, 웨이브렛 변환 [1] 등을 기초로 한 다양한 방법들이 제안되었다. 이들 방법은 HIF 사고 검출에서 한 부분에서는 잘 적용되었지만 HIF 식별의 문제를 완전하게 해결하기 위한 방법은 아직 존재하지 않는다. 한 예로 특징을 추출하기 위해서는 다양한 주파수 범위를 다루어야 하지만 매우 높은 주파수 범위에서 변전소 전류 변압기의 필터링 때문에 어려움이 발생할 수 있다. 이 논문에서는 이산 웨이브렛변환(discrete wavelet transform, DWT)을 사용하여 HIF 검출 방법의 개선을 목적으로 하고 있다.

웨이브렛 기법은 시간 영역과 주파수 영역 모두에서 비정상 신호를 해석하는 수학적 도구로 이 응용에서 과도특성을 분석에 활용한다. 이 논문에서는 웨이브렛 변환을 적용하여 얻은 각 단계별 에너지로부터 에너지 분포 커브를 근간으로 하는 검출 및 분류 알고리즘을 제안한다.

#### 2. 웨이브렛 해석

웨이브렛 해석은 1985년 초에 J. Morlet에 의해 소개되었으며, 음성 및 영상 신호처리 분야에서 많은 관심을 가졌으며, 활발한 연구가 이루어져 왔다. 전력 시스템에서의 DWT는 과도현상 해석 [2], 전력품질 압축, 고조파 해석 등에 적용되었다.

웨이브렛 해석은 시간과 주파수 영역에서 동시에 신호는 해석하는 것으로 시간-주파수 해석 방법의 하나이다. 웨이브렛은 작은 파형(small wave)라는 의미로 유한 에너지와 평균이 0인 함수이다.

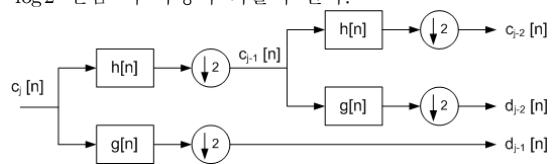
웨이브렛 변환은 STFT(short time fourier transform)의 시간과 주파수 해상도에 관련된 한계를 극복하기 위한 대안으로서 개발되었으며, 모든 주파수 상에서 일정한 시간 해상도를 제공하는

STFT와 다르게 DWT는 높은 주파수에서 좋은 시간 해상도와 낮은 주파수 해상도를 제공하며, 낮은 주파수에서 좋은 주파수 해상도와 낮은 주파수 해상도를 제공한다.

전력 신호를 효율적으로 다루기 위해 이산 데이터를 사용하므로 DWT를 사용하여 처리할 수 있으며, 식 (1)과 같다.

$$DWT_f[m,n] = \langle f, \Psi_{m,n} \rangle = \sum_k f(k) \Psi^* \left( \frac{k - na_0^m b_0}{a_0^m} \right) \quad (1)$$

여기서  $a_0 > 1$ ,  $b_0 > 0$  그리고  $k, m, n \in Z$ 이다. 식 (1)은 FIR 필터의 컨벌루션과 유사하다. CWT에서 발생하는 중복성을 제거하기 위해  $a_0$ 와  $b_0$ 는  $L^2(R)$ 에서 정규직교 기저(orthonormal basis)가 되도록 선택해야 하며, 가장 간단한 방법은  $a_0 = 2$ 와  $b_0 = 1$ 을 선택하는 것으로 다이나딕(dyadic) 정규직교 웨이브렛 변환이 되며, 분리된 신호들 사이에서 중복되는 부분을 완전히 제거할 수 있다. 이 변환의 구현은 서로 다른 스케일의 해상도로 신호를 분해하는 다해상도 해석(multi-resolution analysis, MRA)를 사용하여 단순화할 수 있다. MRA는 필터뱅크를 이용하여 DWT를 구현하는 것으로 신호  $f(n)$ 을 저역통과필터(LPF)와 쌍대인 고역통과필터(HPF)에 통과시켜 나온 결과들을 다운샘플링( $\downarrow 2$ )하여 두 단계로 분리를 하는 것으로 계산이 효율적이며, 구현이 간단하다. 저역통과 필터의 출력을 2로 다운샘플링하면 다음 단계에서 웨이브렛을 2로 시간 스케일 한 것과 같게 되어 팽창(dilation)과정을 단순화할 수 있다. 고역통과 필터의 출력은 신호의 높은 주파수 성분들로 신호의 상세정보를 포함하고 있다. 그림 1은 DWT를 사용한 다해상도 분해과정을 보여준다. 입력 데이터  $c_j(n)$ 을 저역통과 필터  $h(n)$ 과 고역통과 필터  $g(n)$ 을 통과시킨 후 다운샘플링하여 고주파수 성분  $d_{j-1}(n)$ 과 저주파수 성분  $c_{j-1}(n)$ 을 얻게 된다.  $d_{j-1}(n)$ 은  $c_j(n)$ 의 상세 성분을 나타내며,  $c_{j-1}(n)$ 은 근사 성분을 나타낸다. 다음 단계에서  $c_{j-1}(n)$ 은 다시 두 부분으로 분해되는 과정을 거치게 되며, 이러한 과정을 반복하게 된다. 각 분해 단계에서 얻은 데이터의 길이는 이전 단계 데이터 길이의 절반이 된다. 이 과정은 길이  $N$ 인 신호에 대해 최대  $\log_2^N$ 만큼 이 과정이 되풀이 된다.



〈그림 1〉 DWT를 이용한 두 단계 다해상도 분해

웨이브렛 함수가 정규직교함수일 경우 두 필터는 QMF(quadrature mirror filter)로 알려진 필터의 성질을 사용한다. 즉,

$$c_{j-1}(n) = \sum_k h(k-2m) c_j(k) \quad (2a)$$

$$d_{j-1}(n) = \sum_k g(k-2m) c_j(k) \quad (2b)$$

$$g(n) = (-1)^n h(n) \quad (2c)$$

웨이브렛 변환에서 신호가 특정 스케일의 웨이브렛에 근접하게 닮은 곳은 큰 웨이브렛 계수를 나타내고 나머지 스케일에서는 영에 가까운 계수들을 나타낸다. 이러한 성질을 희소성질(sparse property)이라 하며, 전력품질 신호 압축 등의 응용에 활용되는 유용한 성질이다. 모웨이브렛 함수는 매우 다양하게 존재하며, 응용의 성격에 따라 그 결과 역시 다양하다. 전력품질 응

용에서 장애 검출, 국부화(localization) 및 분류 등에 가장 많이 사용되는 웨이블릿 함수는 Daubechies 웨이블릿이다. Daubechies 웨이블릿은 정규직교 웨이블릿으로 다양한 필터 길이를 사용할 수 있다. 참고문헌 [3]에 의하면 Daub4 필터는 필터 길이가 짧으며, 다른 웨이블릿보다 시간상에서 더 잘 국부화하는 것으로 알려져 있다. 다해상도 해석에서 이론적으로  $\log 2^N$ 만큼 분해해 갈 수 있지만 계산의 효율을 높이기 위해 분해 단계의 수를 감소시켜야 한다. 4단계 분해가 보편적이지만, 응용에 따라 7에서 13레벨까지 사용하는 경우도 있다 [4]. Dau4는 천천히 변화하는 주파수 장애를 갖는 신호를 4번째 레벨까지에서 검출할 수 있다. 4단계 분해가 보편적이지만, 응용에 따라 7에서 13레벨까지 사용하는 경우도 있다 [5].

### 3. 검출 및 분류

일반적으로 과도 외란들이 발생되었을 때, 안정적인 전력신호는 외란 구간의 시작과 끝 지점에 비연속 상태를 만든다. MRA의 첫 단계 분해에서 외란 신호를 분해하기 위해서 사용한 DWT는 급격한 변화를 발생시키는 외란의 시작과 끝에서 상대적으로 큰 웨이블릿 계수 값을 발생시킨다. 따라서 이들 웨이블릿 계수들의 절대 값 변화로부터 외란 구간의 시작시간  $t_s$ 와 종료시간  $t_e$ 를 쉽게 얻을 수 있으며, 외란 발생구간  $t_l$ 을 계산할 수 있다.

$$t_l = |t_e - t_s| \quad (3)$$

외란 발생 시점과 끝나는 점, 구간으로부터 무슨 종류의 외란이 발생되었는지 분류하기 위해 외란 신호의 에너지를 서로 다른 해상도 단계에서 구한 계수들에서 얻는다. 에너지 분포는 웨이블릿 계수들로부터 구한다.

전력 외란 신호  $f(t)$ 를 나타내는 웨이블릿 계수들을 다음과 같다고 하자.

$$C_{signal} = [c_0 | d_0 | d_1 | \dots | d_{J-1}] \quad (4)$$

여기서  $J$ 는 해상도 단계들의 전체수를 나타낸다. 서로 다른 해상도 단계들에서  $f(t)$ 의 에너지 분포는  $C_{signal}$ 의 norm을 구해 나타낼 수 있다.

$$E_{signal} = [\|c_0\| \|d_0\| \|d_1\| \dots \|d_{J-1}\|] \quad (5)$$

$$\|c_0\|_2 = \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_0(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\|d_j\|_2 = \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

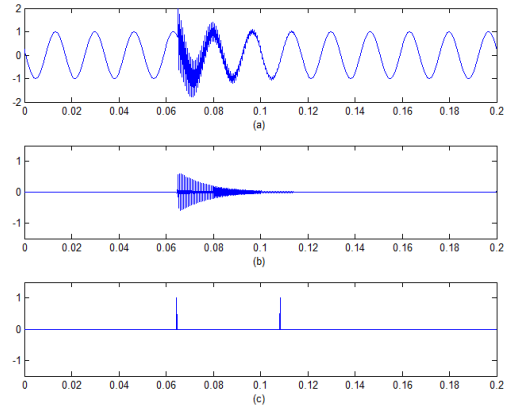
DWT 영역에서 전력 장애들과 관련된 웨이블릿 변환계수들은 큰 값을 보유하고, 상대적으로 장애가 발생되지 않은 곳은 매우 작은 계수 값을 갖고 있다.

에너지 분포는 모웨이블릿 함수에 따라 서로 다른 결과를 보여 줄 수 있다. 그러나 외란이 발생하는 곳에서의 에너지 분포 윤곽선은 변화하지 않는다.

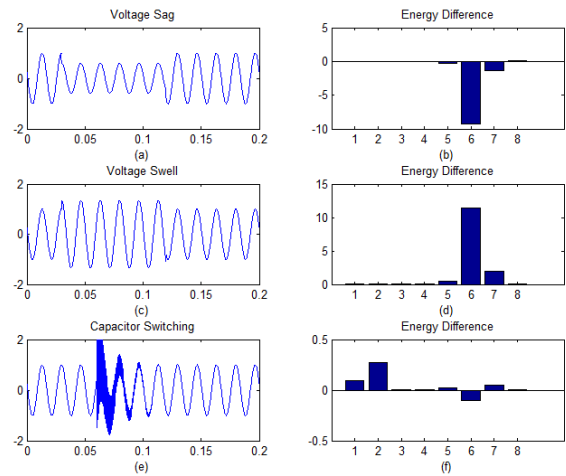
### 4. 모의실험

모의실험에 사용되는 외란신호는 전압강하, 전압 상승 및 커패시터 스위칭 신호에 대해 적용하였다. 이 신호들은 matlab을 사용하여 생성하였으며 웨이블릿 모함수는 Daubechies 4를 사용하였다. 그림 2(a)는 커패시터 스위칭 현상이 0.065sec에서부터 0.12sec까지에서 발생한 신호로 0.055sec 동안 발생하였다. 이 신호에 DWT를 적용하여 구한 그림 2(b)의 상세계수에서 외란 시작되는 시점과 끝나는 시점을 구하였다. 모의실험에서 구한 시작 시점은 0.0645sec이며 끝나는 시점은 0.108sec이었으며, 구간은 0.0435로 상당히 정확하게 외란 발생 시점과 발생구간을 얻을 수 있었다. 전압강하 및 전압상승의 경우에는 매우 정확하게 외란 발생 시점과 끝나는 시점과 구간을 구할 수 있었다.

전력신호에서 자주 발생하는 외란과 과도현상에서 DWT를 적용하여 단계별 상세계수들의 에너지 분포를 구하고, 이 분포에서 순수정현파 에너지 분포로부터 편차를 구하여 편차 특성을 보면 전압 강하의 경우 횡축을 중심으로 아래쪽으로 에너지 편차가 존재하고 상승의 경우에는 위쪽으로 에너지 편차가 존재하고 한 곳에 모여 있음을 알 수 있다. 커패시터 스위칭의 경우 에너지 편차는 횡축을 중심으로 위쪽에 존재하다가 아래쪽으로 내려가면서 영교차가 발생하며 완전한 에너지 편차를 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 에너지 편차는 외란 및 과도현상의 발생 시간에 영향을 받지 않고 존재하며, 윤곽도 외란 형태의 진폭 변화에도 불구하고 거의 동일하다.



〈그림 2〉 커패시터 스위칭 외란 신호의 발생시점과 끝나는 시점. (a) 커패시터 스위칭 외란신호 (b) DWT 상세 계수 (c)외란 발생시점과 종료시점



〈그림 3〉 외란신호와 에너지 편차 (a) 전압강하 (b) 전압강하 에너지 편차 (c) 전압상승 (d) 전압상승 에너지 편차 (e) 커패시터 스위칭 (f) 커패시터 스위칭 에너지 편차

### 5. 결론

본 연구는 고저항 사고 검출 및 분류를 하기 위한 기초적인 데이터 획득 및 알고리즘 개발을 위한 것으로 웨이블릿 변환을 사용하여 외란 발생 시작 시점과 끝나는 시점을 구할 수 있으며, 이들 값으로부터 외란 발생 구간을 파악할 수 있다. 또한 에너지 편차로부터 발생하는 외란의 종류를 분류할 수 있다.

### 〔참고 문헌〕

- [1] D. T. W.Chan and X. Yibin, "A noble technique for high impedance fault identification," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 738-744, 1998.
- [2] S. Santos, E. J. Powers, W.M. Grady and P. Hofman, "Power quality assessment via wavelet transform analysis," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 2, pp. 924-930, 1996.
- [3] N. S. D. Brito, B. A. Souza, F. A. C. Pires, "Daubechies wavelets in Quality of Power", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, Oct. 1998 pp.511-515.
- [4] N. S. D. Brito, B. A. Souza, F. A. C. Pires, "Daubechies wavelets in Quality of Power", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, Oct. 1998 pp.511-515.
- [5] K. L. Butler-Purry and M. Bagriyanik, "Characterization of Transient in Transformers Using Discrete Wavelet Transforms," IEEE Trans. Power System, Vol. 18, No. 2, pp. 648-656, 2003.