

## 웨이브렛 변환을 이용한 직렬 아크고장의 shoulder 검출에 관한 연구

정영식\*, 방선배\*\*, 김동욱\*\*  
인천대학교\*, 전기안전연구원\*\*

### Shoulder Detection of Series Arc-fault Based on Wavelet Transform

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

**Abstract** - Many waveform characteristics of arc signal support the detection of hazardous arc faults. The shoulder is one of main characteristics of arc signal. This paper provide a method for the detection of shoulder from series arc fault based on discrete wavelet transform. The simulation results show that the proposed method is reliable and simple.

#### 2. 아크 특성

아크는 거의 모든 전기환경에서 발생될 수 있으며, Paschen 법칙에 의해 설명될 수 있는 잘 알려진 현상이다. 아크를 생성하기 위한 파괴전압은 두 전극 사이에 존재하는 기체 압력과 전극들 사이의 간극이다. 전극 사이에 일정한 전압이 걸리게 되면 기체가 절연 파괴 되어 방전되고 전류가 흐르게 된다. 이때 중심부의 온도는 5,000~15,000°C 정도의 고온이다. 아크 근처의 열과 방출되는 기체에 연소물질이 노출되면 전기화재의 원인이 될 수 있는 것이다. 아크 전류는 아크의 발생 위치에 따라 직렬아크, 병렬아크, 접지아크로 나타낼 수 있다. 직렬아크는 부하와 직렬로 연결된 도선선 사이에 발생하는 아크로 부하에 의하여 아크에 흐르는 전류의 크기가 조절된다. 따라서 아크 전류는 부하에 의한 전류보다 더 클 수는 없다. 그러므로 에너지 레벨이 낮기 때문에 기존의 파전류 보호 장치의 보호 범위에 속하지 않는다. 병렬아크와 접지아크는 직렬아크의 발생에서 진전이 되므로 직렬아크를 검출하게 되면 단락과 지락으로 이어지는 사고를 예방할 수 있다. 일반적인 직렬아크의 전압 및 전류 파형이 그림 1에 나타내었다[6]. 아크 전압파형은 펄스파 형태를 이루고 있으며, 전류 파형은 zero-crossing 근처에 shoulder를 이루고 있음을 볼 수 있다.

#### 1. 서 론

오늘날 전기 배선 시스템에는 과전류 및 단락회로부터 망을 보호하기 위해 차단기와 퓨즈를 사용하고 있다. 그러나 이러한 보호에도 불구하고 소방방재청의 "2006년도 화재통계 연감"에 의하면 전기에 의한 화재 발생 건수가 연간 9,392건으로 전체화재의 29.6%를 점유하고 있다. 특히 아크를 동반하는 단락과 누전 사고는 전기화재 발생 원인의 약 69%로 매우 높은 비율을 차지하고 있다 [1]. 전기 아크는 많은 전기회로에서 일상적으로 발생된다. 예로 전기 드릴과 진공청소기와 같이 브러쉬 모터를 갖고 있는 부하들에서는 작고 반복적인 스파크 불꽃을 볼 수 있으며, 아크의 강도는 모터가 수명이 다해가면서 더 커지게 된다. 또한 아크 고장이 발생하는 동안 주변에 가연성 물질 또는 가스가 있어 접화되어 화재를 유발시키는 가능성이 농후한 아크들이 있다. UL 1699 표준에서 아크는 "절연물질을 가로 질러 발생하는 발광 방전으로 전극의 말단 부분에 용해를 동반하는 현상"으로 정의하였으며, 아크 고장을 "회로에서 의도하지 않은 아크"로 정의하였다. 따라서 정상 동작 부분으로 아크를 발생시키는 것은 아크 고장으로 취급하지 않는다 [2].

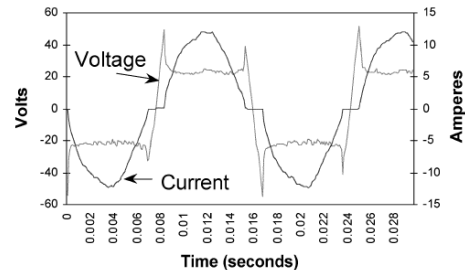


그림 1. 아크 전압 및 전류 파형[6]

미국 소방청(USFA)는 가정집 전기배선이 가전제품보다 2배 정도 전기화재의 원인이 된다고 보고하였으며, 이러한 화재발생 원인들 중의 주요한 요소가 아크 고장이었다. 이에 따라 미국에서는 2005년 NEC의 요구에 의해 2008년부터 AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter)를 부역을 제외한 침실 등의 공간에 설치하도록 법제화하였다. 우리나라에서는 미국 시장을 대상으로 120[Vrms]에 적합한 AFCI 개발을 하여 소수의 제품들이 나와 있으나 우리나라 여건을 고려한 220[Vrms]에서 사용될 수 있는 제품의 시장 형성이 아직 어려운 실정이다. 이는 우선 AFCI에 대한 표준을 제시하고 있는 UL 1699가 미국의 현실을 고려한 것이어서 국내의 전기환경과 다른 점이 있어 국내 전기환경을 고려한 표준이 제시되어야 할 것이다. 거주지 배선에서 240[Vrms]와 120[Vrms] 직렬아크 고장을 비교한 참고문헌 [3]에서 120Vrms보다 240Vrms에서 더 높은 발화가능성이 있으며, 발화 시간도 짧아지지만 이 두 전압에서 아크가 갖는 특성은 거의 유사한 것으로 나타났다.

#### 3. 웨이브렛 해석

아크는 정상 파형이 일그러지는 shoulder에서 아크가 소멸하고 재점화되며, 전류 파형의 계곡에 잘 나타나 있다. 따라서 아크를 검출하기 위해서는 아크 존재의 개연성을 알려주는 shoulder의 검출이 일단 이루어져야 할 것이다. Shoulder의 검출을 위해 신호처리 응용분야에서 널리 사용되는 웨이브렛 해석을 사용한다.

웨이브렛 해석은 시간과 주파수 영역에서 동시에 신호를 해석하는 것으로 시간-주파수 해석 방법의 하나이다. 웨이브렛은 작은 파형(small wave)라는 의미로 유한 에너지와 평균이 0인 함수이다. 이산웨이브렛변환(discrete wavelet transform, DWT)는 높은 주파수에서 좋은 시간해상도와 낮은 주파수 해상도를 제공하며, 낮은 주파수에서는 역으로 좋은 주파수 해상도와 낮은 시간해상도를 제공한다. 아크 파형을 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  $k, m, n \in \mathbb{Z}$ 이다. 식 (1)은 FIR 필터의 컨벌루션과 유사하다. 다해상도 해석(multi-resolution analysis, MRA)을 이용한 DWT 구현을 위해  $a_0 = 2$ 와  $b_0 = 1$ 을 선택하여 dyadic 구현을 한다. MRA는 입력 데이터  $f(n)$ 을 저역통과필터(LPF)와 쌍대인 고역통과필터(HPF)에 통과시켜 나온 결과들을 다운샘플링(↓2)하여 두 단계로 분리하는 것으로 계산이 효율적이며, 구현이 간단하다. 저역통과 필터의

아크 특징들 중에서 대표적인 특징이 shoulder이다. 전압이 zero-crossing 근처에 근접함에 따라 아크는 스스로 소멸되고 아크 전류는 거의 평탄한 0 전류 값을 갖는다. 다시 충분한 전압이 아크가 재점화될 때까지 0 전류 값을 유지하게 되는데 이 평탄한 부분을 shoulder라고 한다. 반주기로 발생하며, 전압 파형은 방형파에 가까우며 산발적으로 정상전류 사이에서 순간적으로 높게 나타나는 경우가 많다 [4]. 아크가 소멸하고 재점화하는 과정에 부산물로 광대역 잡음이 나타나며, 아크가 소멸되면 광대역 잡음은 사라진다. 이 광대역 잡음과 shoulder은 아크 사고 판별에 사용되는 중요한 요소들이다. 아크 특징들을 주파수로 나타내기 위해 푸리에 해석을 사용한 스펙트럼 해석은 선형 시스템과 안정 신호라는 조건을 요구한다. 그러나 아크는 비선형, 비정상 특성을 갖고 있어 기존의 푸리에 해석을 적용하는데 한계가 있다.

본 논문에서 비정상 신호 해석에 많이 활용되고 있는 웨이브렛 해석(wavelet analysis)을 아크 신호에 적용하여 중요한 특징들의 하나인 shoulder를 검출하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 웨이브렛 기법은 시간 영역과 주파수 영역 모두에서 비정상 신호를 해석하는 수학적 도구로 사용된다.

출력을 2로 다운샘플링하면 다음 단계에서 웨이브렛을 2로 시간 스케일한 것과 같게 되어 팽창(dilation) 과정을 단순화할 수 있다. 고역통과 필터의 출력은 신호의 높은 주파수 성분들로 신호의 상세정보를 포함하고 있다. 그림 2는 DWT의 다해상도 분해 과정을 나타내준다. 입력  $c_j(n)$ 을 저역통과 필터  $h(n)$ 과 고역통과 필터  $g(n)$ 에 통과시킨 후 2로 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 상세성분(detail components)을 나타내며,  $c_{j-1}(n)$ 은 근사성분(approximate components)을 나타낸다. 다음 단계에서  $c_{j-1}(n)$ 는 다시 두 부분으로 분해되는 과정을 거치게 되며, 이러한 과정을 반복하게 된다. 각 분해 단계에서 얻어지는 데이터의 길이는 이전 단계 데이터 길이의 절반이 된다. 이 과정은 길이  $N$ 인 데이터에 대해 최대  $\log_2 N$  만큼 이 과정이 되풀이 된다.

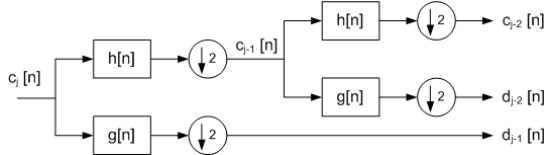


그림 2. DWT를 이용한 두 단계 다해상도 분해

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

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

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

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

웨이브렛 변환에서 신호가 특정 스케일의 웨이브렛에 근접하게 닿은 곳은 웨이브렛 계수의 값이 크게 나타나며, 나머지 스케일에서는 0에 가까운 계수들로 나타난다. 이러한 성질을 희소성질(sparse property)이라 한다. 모웨이브렛 (mother wavelet) 함수는 매우 다양하게 존재하며, 응용의 성격에 따라 그 결과 역시 다양하다. 전력품질 등의 응용에서 외란 검출, 국부화(localization) 및 분류 등에 가장 많이 사용되는 웨이브렛 함수는 정규직교 웨이브렛인 Daubechies 웨이브렛 함수이며, 다양한 필터 길이를 갖고 있다. 참고문헌 [7]에 의하면 Daub4 필터가 필터 길이가 짧으면서, 시간상에서 더 잘 국부화하는 것으로 알려져 있다.

#### 4. 아크 shoulder 검출

아크 전류에 다해상도 해석 MRA를 적용하여 분해하면 아크 신호에서 급격한 변화를 발생시키는 부분의 시작과 끝나는 점에 상대적으로 큰 웨이브렛 계수 값들을 발생시킨다. 따라서 변화가 발생하는 이 웨이브렛 계수들에 절대 값을 취한 후 문턱 값을 적용하여 작은 값들의 계수들을 제거 한 후 남아 있는 웨이브렛 계수들로부터 shoulder가 발생하는 구간들의 시작시간  $t_s$ 와 종료시간  $t_e$ 를 구할 수 있으면 지속시간  $t_d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

아크 발생시 아크를 통해 흘러가는 전류에 의한 부산물로 잡음이 발생된다. 이 잡음은 수십 Hz에서 GHz까지 될 수 있다. 그림 3은 UL1699

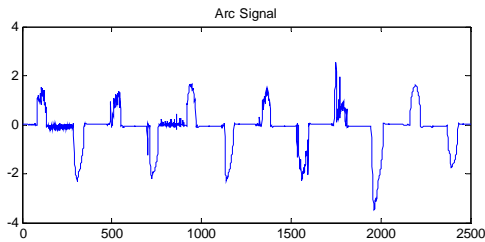


그림 4. 컴퓨터 부하에 의한 직렬아크 신호

표준에 의해 만들어진 직렬아크 발생기와 컴퓨터 부하를 연결한 후에 얻은 직렬아크 신호이다.

그림 4의 아크 신호 shoulder에 상당한 양의 잡음이 나타나 있음을 볼 수 있다. 아크 shoulder의 검출 정확도를 높이기 위해 전처리 단계로 저역통과 필터를 사용하여 잡음을 제거하는 방법으로 웨이브렛 Db4를 사용하여 웨이브렛 변환을 4단계까지 시도한 후 상세계수들을 모두 0으로 놓은 상태에서 다시 복구하여 그림 5와 같은 신호를 얻는다. 이 근사화된 신호 그림 6(a)에 다시 Db4 웨이브렛 변환을 적용하여 웨

이브렛 상세 계수들에 절대 값을 그림 6(b)에 나타내었다. 웨이브렛 계수들의 절대 값에 식 (4)의 문턱 값을 적용하여 이진수로 그림 6 (c)와 같이 나타내었다.

$$\lambda = (1 - \mu) \max\{|d|\} \quad (4)$$

여기서  $\lambda$ 는 적용되는 문턱 값이며,  $\mu$ 는 문턱 값 인수로  $0 \leq \mu \leq 1$ 의 범위를 갖고 있다.  $\max\{\}$ 는 벡터  $d$ 에 절대 값의 최대값을 선택하는 것이다. 이 모의 실험에서  $\mu = 0.4$ 를 선택하였다.

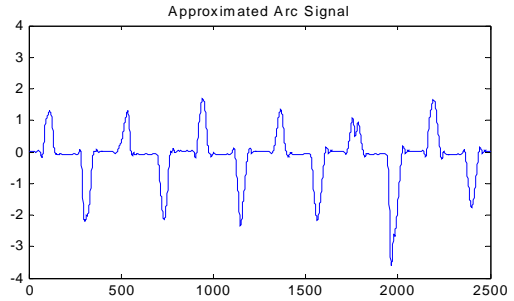


그림 5. 근사화된 아크 신호

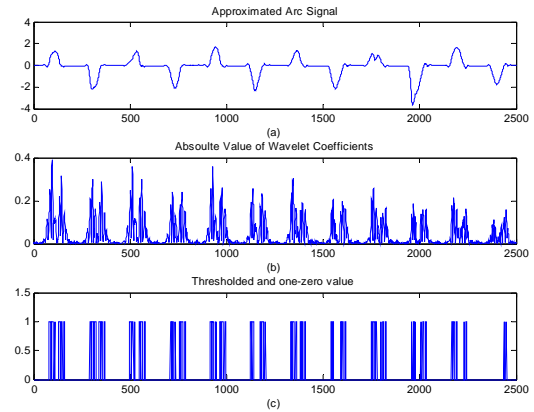


그림 6. Shoulder 검출

그림 6 (a)와 (c)를 비교해보면 shoulder가 발생하는 지점을 거의 정확하게 나타내고 있으며, 일정한 주기성을 보여준다.

#### 3. 결 론

아크고장 신호의 주요 특징인 shoulder의 검출을 웨이브렛 변환을 근간으로 하여 제안하였다. 적용하는 방법이 간단하지만 상당히 신뢰성 높게 shoulder 부분을 검출하는 것을 볼 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 소방방재청(2007), "2006년도 화재통계 연감"
- [2] UL Standard for Safety for Arc Fault Circuit Interrupters, UL 1699, 2nd Edition, April 7 2006.
- [3] John J. Shea, "Comparing 240Vrms to 120Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire", Proceeding of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 218-224, Oct. 2008.
- [4] Carlos E. Restrepo, 'Arc Fault Detection and Discrimination Methods', Proceeding of the 543rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 115-122, Sept. 2007.
- [5] George D. Gregory and Gray W. Scott, "The Arc-Fault Circuit Interrupter: An Emerging Product", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 34, No. 5, pp. 928-933, Sept/Oct, 1998.
- [6] George D. Gregory, K. Wong, and Robert F. Dvorak, "More About Arc-Fault Circuit Interrupters", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 40, No. 4, pp. 1006-1011, July/Aug, 2004.
- [7] N. S. D. Brito, B. A. Souza, and F. A. C. Pires, "Daubechies wavelets in Power Quality", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, pp. 511-515, 1988