

# 웨이블렛 변환을 이용한 비선형 부하 전원선에서의 직렬 아크고장 신호 분석

論 文
57-8-25

## Analysis of Series Arc-Fault Signals Using Wavelet Transform From Non-linear Loads

方善培<sup>†</sup> · 朴鍾演<sup>\*</sup> · 張牧淳<sup>\*\*</sup> · 崔原豪<sup>\*\*\*</sup>

(Sun-Bae Bang · Chong-Yeun Park · Mog-Soon Jang · Won-Ho Choi)

**Abstract** - In this paper, a new detection method of series arc-fault signals occurring at the wiring of home appliances is proposed. The discrete wavelet transform was used for the numerical analysis of the variation rate in peak, RMS, noise energy, shoulder of the arc-fault current wave. As a results, the arc distinction threshold value of these variation rates was about 0.1 in most cases. The arc-fault current of the loads with the active PFC circuit showed a high rate of variation in noise energy and shoulder, but arc-fault current of the loads without the active PFC circuit showed a high rate of variation in peak and RMS. The arc fault current in resistive loads showed a high rate of variation in shoulder.

**Key Words** : Series arc-fault, Wavelet transform, Electrical fire, Shoulder, Home appliance.

### 1. 서 론

최근의 전기 사용량은 산업의 발달로 인해 점점 증가됨에 따라 전기로 인한 피해도 증가되고 있는 추세이다. 2000년 NFPA 70E에 의하면, 미국에서 매년 42,900여건의 전기화재가 발생하고 있으며, 이들 전기화재 발생건수 중 15,200여건은 주택 벽 내부의 고정된 배선에서 발생하고 7,800여건은 코드와 플러그에서 발생하며 8,400여건은 전등 및 전열 기구에서 발생한다고 발표되고 있다. 국내에서는 2006년도에 발생한 화재가 31,778건이며 이중 전기화재는 9,329건으로 29.6%를 점유하고 있다. 원인별로는 단락에 의한 화재가 전체의 62.0%인 5,819건이고, 다음으로 과부하에 의한 전기화재가 783건으로 8.3%를 차지하며, 접촉 불량으로 인한 화재가 493건(5.2%) 발생하였다. 최근 10년간의 전기화재 발화 원인 통계를 보면 단락에 의한 화재는 줄어드는 반면 본 연구와 관련된 접촉 불량에 의한 화재는 증가하는 경향이 있다.[1]

직렬 아크고장 신호 분석을 위한 연구는 최근까지 활발히 진행되고 있으며, 신호 분석을 위한 도구로써 주파수 분석을 위한 푸리에 변환(FT : Fourer Transform)과 시간-주파수 분석을 위한 웨이블렛 변환(WT : Wavelet Transform)이 많이 사용된다. 푸리에 변환은 고조파 성분 분석[2-4], 내부 고조파(inter-harmonic) 성분 분석[5], 고주파수 성분 분석[6], 에너지 변화[7-8]를 계산하는 도구로 사용되고 있다. 최

근에는 좀 더 선택적인 검출 목적의 필요성으로 순간적으로 발생하는 아크고장 형태의 특징과 주파수 특징을 동시에 검출할 수 있는 웨이블렛 변환 방법을 많이 사용한다.

기존의 논문은 송전 및 배전계통에서 계통보호를 목적으로 아크를 검출하기 때문에 아크고장의 발생 시점과 지속시간을 중요시하여 웨이블렛 변환 방법 중, 이산 웨이블렛 변환의 상세 계수(Detail coefficient)를 분석하는 방법을 이용한다. 또한 송전 및 배전계통의 부하 전류는 대용량이며 선형이기 때문에 아크고장이 발생할 경우 아크고장의 특징인 shoulder의 발생 유무를 통하여 아크고장을 판별하게 된다.

그러나 본 논문에서는 일반 가정이나 건물 구내 비선형 부하의 전원선에서 발생하는 직렬 아크고장을 검출하기 위하여 이산 웨이블렛 변환의 근사(Approximation)계수를 분석하는 방법을 사용하였다[13]. 이전의 논문[13]에서 제시한 아크고장 검출 항목에 새로운 항목을 추가하여 고장 검출 확률을 높이고, 고장 검출을 위한 적합한 판별 기준치(threshold)를 결정하며, 각각의 부하에 대한 검출 확률을 수치적으로 제시한다. 또한, 직렬 아크고장에 의해 나타나는 부하전류의 변화 특성을 분석하고, 동일 특성에 따라 아크고장을 검출하기 위한 항목을 선정한다.

### 2. 전기화재 보호장치의 특성

전선 및 전기설비의 절연이 파괴되어 발생하는 화재 및 감전 사고를 예방하기 위하여 예방장치를 개발하고 적용할 수 있도록 1976년 KS C 4613(누전차단기)을 제정하게 되었다[14]. 그러나 이러한 누전차단기는 감전사고 방지에 많은 효과를 얻었지만 저 전류에서 발생하는 전기화재 예방 측면에서는 많은 효과를 얻지 못하였다. 그림 1은 과전류 보호를 위한 전형적인 20A용 누전차단기의 시간-전류 특성 곡선으로, 이들 곡선의 조건에 만족되면 누전차단기는 해당 회

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 電氣安全研究院 先任研究員

E-mail : bimil5018@naver.com

<sup>\*</sup> 正會員 : 江原大學 電氣·電子工學科 教授

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 江原大學 電氣·電子工學科 工博

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 江原大學 電氣·電子工學科 工博

接受日字 : 2008年 4月 7日

最終完了 : 2008年 6月 13日

로를 분리 차단한다. 하지만 누전 차단기의 시간-전류 조건이 1과 2로 표시된 영역에서는 회로를 보호할 수 없다. 이들 곡선은 도체를 통해 흐르는 전류에 의한 줄-열에 의해 발생하는 절연체의 열적 손상으로부터 배선을 보호하기 위한 것이지만 아크의 영향으로부터 회로를 보호하기 위한 것은 아니기 때문이다[15][16].

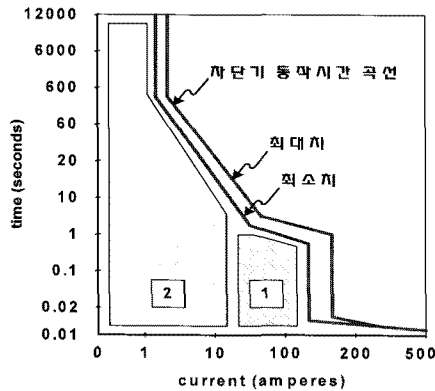


그림 1 20A 누전차단기 동작시간 곡선  
Fig. 1 Response characteristic of a 20A circuit breaker

영역 1은 누전차단기의 동작곡선에서 정상상태의 범위에 속하기 때문에 과전류에 의해 차단되지 않는 단락회로 영역이다. 이 영역에서의 아크 에너지는 순간적으로 크기 때문에 짧은 시간에 인화성 물질이나 유기 절연물질을 착화시키는데 충분하며, 병렬 아크 영역이 된다.

영역 2는 아크전류가 부하와 직렬상태일 때 갖는 낮은 에너지 영역이다. 물질의 착화는 아크발생 지속 시간이 길지 않는 한 영역 1에서 보다 발생되지 않는다. 하지만 직렬 아크는 분진, 절연체와 같은 물질로 인하여 발생이 지속되고 외부 충격, 전선의 접속점, 단자대 등에서 자주 발생되어 화재의 위험이 크다. 또한 영역 1의 아크는 병렬 아크이기 때문에 회로의 부하가 회로 도체가 되며, 전류가 크기 때문에 전류가 작은 직렬 아크보다 명확히 검출된다. 그러나 영역 2의 아크는 회로에 연결되어 있는 부하에 대응하기 때문에 낮은 전류 레벨을 갖는다. 이러한 직렬 아크 특성은 부하기기의 특성으로 인해 없어지거나 변질되는 경향으로 나타날 수 있으며, 부하기기의 자체 동작 특성으로 아크가 발생하지 않았을 경우에도 아크와 비슷한 특성이 나타날 수 있다. 이와 같은 이유로 직렬 아크고장 신호는 부하기기의 특성과 유사성으로 정확히 검출하기가 어렵다[15][16].

### 3. 이산 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 기존의 푸리에 변환(FFT) 및 창 함수를 이용한 푸리에 변환(STFT)의 단점을 보완하는 시간-스케일 변환이다. 웨이블릿 변환은 연속 웨이블릿과 이산 웨이블릿으로 나누어지고, 연속 웨이블릿 변환은 비정상신호(non-stationary signal) 등의 스케일 특성 표현에 사용되며 이산 웨이블릿 변환은 스케일 함수와 웨이블릿 함수를 이용하여 신호의 데이터 프로세싱 및 분석에 유용하게 사용된다.

웨이블릿은 모 웨이블릿이라 불리는 하나의 함수에서 스케일링(scaling)의 변화 및 전이(translating)로 산출되는 함수들의 집합체이며, 진동하고 0으로 수렴하며 면적의 합이 0이 되는 특징을 갖는다. 스케일은 입력 신호의 고주파수 성분과 저주파수 성분의 정보를 각각 얻기 위하여 모 웨이블릿을 압축하고 팽창하는데 사용되며, 전이는 입력 신호의 시간 정보를 얻기 위하여 사용된다. 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환을 사용하며, 정의식은 식 (1)과 같다.

$$DWT\{f(m, n)\} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \Psi^* \left( \frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\Psi(\cdot)$ 는 스케일 파라미터  $a_0^m$ 에 의하여 팽창되고 전이 파라미터  $kb_0 a_0^m$ 에 의하여 전이되는 모 웨이블릿이다. 여기서,  $a_0 > 1$  이고  $b_0 > 0$  인 고정된 값이며,  $m$ 과  $n$ 은 정수이다. 특히 이산 웨이블릿 변환을 본 논문에서와 같이 2분 변환으로 스펙트럼 분석에 사용할 경우에는  $a_0 = 2$ ,  $b_0 = 1$ 이 되어 식 (2)와 같이 표현된다.

$$DWT\{f(m, n)\} = \sum_k f(k) 2^{m/2} \Psi^*(2^{-m} n - k) \quad (2)$$

식 (2)에 스케일 계수와 웨이블릿 계수를 도입하면, 스케일 계수(근사 계수)는 스케일 함수  $\varphi_{j,k}(n)$ 와 입력신호  $f(k)$ 의 내적으로 식 (3)과 같다.

$$c_j(k) = \langle f(k), \varphi_{j,k}(n) \rangle = \sum_k f(k) \varphi_{j,k}(n) \quad (3)$$

웨이블릿 계수(상세 계수)는 웨이블릿 함수  $\psi_{j,k}(n)$ 와 입력신호  $f(k)$ 의 내적으로 식 (4)와 같다.

$$d_j(k) = \langle f(k), \psi_{j,k}(n) \rangle = \sum_k f(k) \psi_{j,k}(n) \quad (4)$$

여기서, 스케일 함수  $\varphi_{j,k}(n)$ 와 웨이블릿 함수  $\psi_{j,k}(n)$ 는 식 (5), 식 (6)과 같이 정의되며, 모 웨이블릿  $\Psi(n)$ 의 선택에 의해 결정된다.

$$\varphi_{j,k}(n) = 2^{j/2} \varphi(2^j n - k) \quad (5)$$

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{j/2} \Psi(2^j n - k) \quad (6)$$

식 (5), 식 (6)의 스케일 함수와 웨이블릿 함수는 해상도 레벨의 변화에 따라 계산이 가능한 low-pass filter  $h_0$ 와 high-pass filter  $h_1$ 를 사용한 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$c_j(k) = \sum_m h_0(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (7)$$

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (8)$$

이산 웨이블릿 변환은 식 (3), 식 (4)을 이용하여 그림 2와 같은 분해(decomposition) 트리 구조로 신호를 분석한다. 입력신호  $f(t)$ 는 스케일 함수를 기저로 하는 저역통과 필터를 적용하여 근사 성분에 해당하는 근사 계수  $c_{j-1}$ 을 얻고, 웨이블릿 함수를 기저로 하는 고역통과 필터를 적용하여 상세 성분에 해당하는 상세 계수  $d_{j-1}$ 을 얻으며, 그 다음 단계에서는 근사 계수에 대해서만 저역통과 필터 및 고역통과

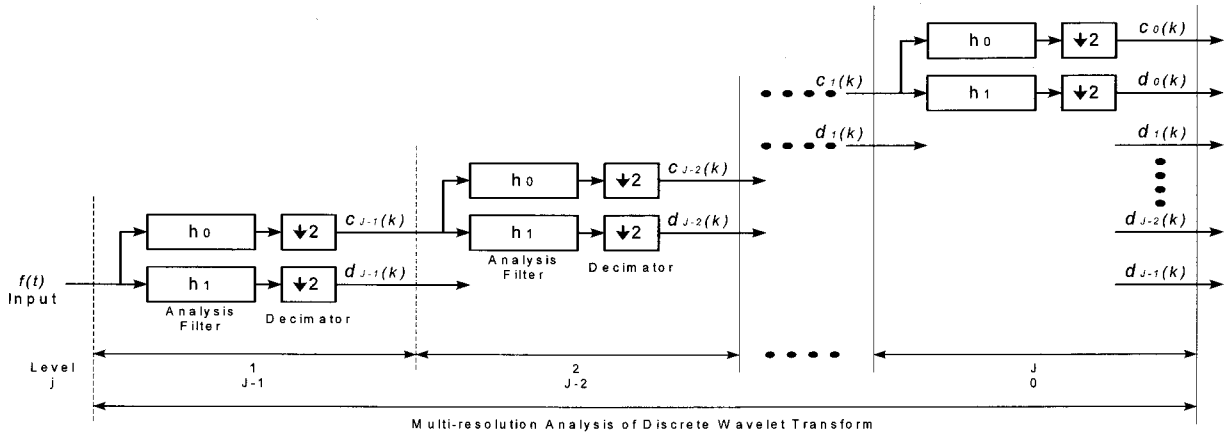


그림 2 이산 웨이블릿 변환 분해 트리  
Fig. 2 Decomposition tree of discrete wavelet transform

필터가 적용되는 트리구조이다.

이산 웨이블릿 변환의 기저로 사용 가능한 모 웨이블릿은 그 종류가 다양하나 본 논문에서는 Li[9]의 연구 결과와 같이 직렬 아크고장 신호 분석에 적합한 Daubechies db10을 적용하였다. 이산 웨이블릿 변환의 레벨 깊이는 전류의 최소 및 최대치를 분석하기 위하여 원 신호가 왜곡되지 않고 노이즈 및 펄스 신호가 원 신호보다 작아지도록 레벨 10으로 결정하였다.

#### 4. 직렬 아크고장 신호 발생 및 측정

##### 4.1 아크고장의 종류 및 특성

아크란 전기 배선 등 두 개의 전극 사이에 존재하는 기체가 전압강하에 의하여 전기적으로 방전되어 전류가 흐르는 것이다. 이때, 두 전극 사이에는 주울 열이 발생하며  $i^2t$ 의 식으로 표현된다. 이렇게 발생한 주울 열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이러한 열은 전기화재의 원인이 된다 [16]. 아크가 발생하면 두 개의 전극 사이에 존재하는 기체가 전기적으로 전도되기 충분한 온도를 유지하며 분자들은 아크 내에서 전체적으로 또는 부분적으로 해리가 되어 이온화가 된다. 아크는 전자가 한 전극에서 다른 전극으로 흘러 들어가는 구조로 되어 있는데 전기 도선의 종류, 도선의 단면적, 전압·전류의 크기에 따라 온도와 기하학적 특성이 변하기 때문에 동일한 형태를 가지지 않는다. 즉, 아크는 실제 이온화 에너지, 해리 에너지 등의 전기적 특성과 금속의 성질에 따라 다르게 나타난다. 그림 3은 가정용 부하의 저압 배선에서 발생하는 4가지 형태의 아크고장이다[15][16].

그림 3(a)는 직렬 아크고장이며 부하와 직렬로 연결된 하나의 도선에서 발생하고, 전원선의 단선, 반 단선 또는 접속 기구에서 전선이 느슨하게 연결될 경우 발생한다. 그림 3(b)는 병렬 아크고장이며, 서로 다른 두 개의 극성을 갖는 전선에서 발생하고 대 전류가 발생하는 특징이 있다. 그림 3(c)는 도선을 보호하고 있는 전선의 절연체가 파손되어 전원선과 대지 사이에서 발생하는 접지 아크고장이며, 그림 3(d)는

부하의 전원선과 다른 전원선 사이에서 발생하는 cross-talk 아크고장이다[15][16]. 본 논문에서는 그림 3(a)와 같은 직렬 아크고장 전류를 분석한다.

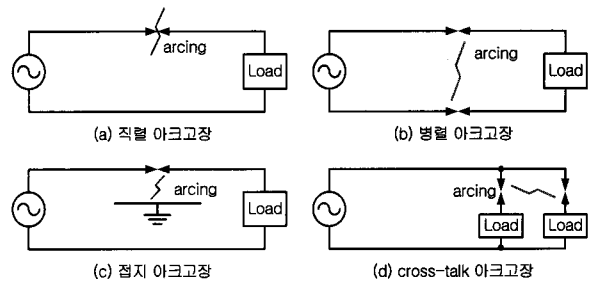


그림 3 아크고장의 분류  
Fig. 3 Classification of arc-fault

##### 4.2 아크고장 전류 측정회로 및 발생장치

직렬 아크고장 전압·전류를 측정하기 위한 회로는 그림 4와 같다.

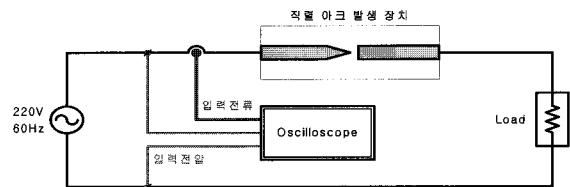


그림 4 직렬 아크고장전류 측정 회로  
Fig. 4 Series arc-fault current detection system

실험을 위한 아크 발생장치는 UL1699 규정에 의해 개발되었고 구성도는 그림 5와 같다. 아크 발생장치는 고정전극과 이동전극으로 구성되며, 고정전극은 구리 봉을 사용하였고 이동전극은 탄소-흑연 봉을 사용하였다. 이동전극에는 미세한 스프링을 전·후에 고정하여 아크가 발생할 경우 아크가 지속될 수 있도록 하였다[17].

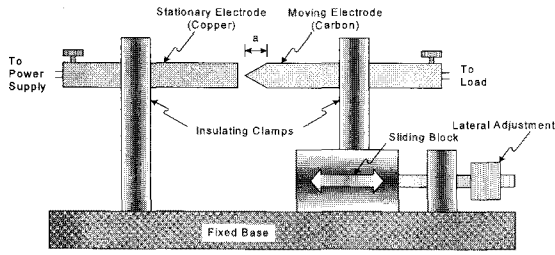


그림 5 직렬 아크고장 발생 장치  
Fig. 5 Series arc-fault generator

### 4.3 직렬 아크고장 전류 측정

본 논문에서 사용된 부하는 일반 가정에서 많이 사용하고 있는 개인용 컴퓨터, 텔레비전, 형광램프, 냉장고, CFL 램프, 가정용 히터, 전자렌지, 백열램프 등 8개 부하이며, 각각의 부하에서 정상전류와 직렬 아크고장 전류를 측정하였다. 그림 6은 각 부하에서 측정된 아크고장 전류 파형이다.

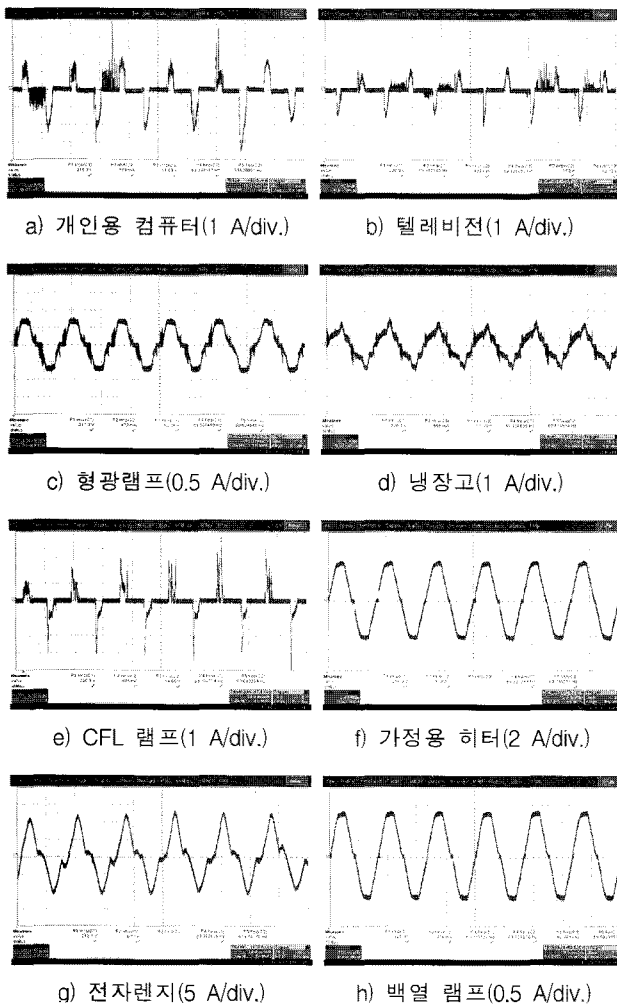


그림 6 가정용 부하의 아크고장 전류 파형(100 V/div.)  
Fig. 6 Current waveforms of the arc-fault on home appliances

## 5. 직렬 아크고장 전류 검출

### 5.1 직렬 아크고장 전류 검출 알고리즘

직렬 아크고장 전류와 정상전류의 차이를 정확히 검출하기 위해서는 전류의 형태뿐만 아니라 주기적인 변화를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 그러나 직렬 아크고장 전류는 크기 변화가 매우 급격하고 심한 고주파 노이즈를 포함하고 있기 때문에 직접적인 분석은 오차를 유발할 가능성이 높다. 그러므로 아크로 인한 급격한 크기 변화와 고주파 노이즈를 분리하고 분리된 고주파 잡음만을 제거하는 것이 아크 검출에 있어 중요한 사항이다. 이때 고주파 잡음을 제거하기 위한 저역통과 필터의 사용은 과도 주파수 영역의 폭이 비교적 넓고 위상 오차를 가지기 때문에 급격한 크기 변화를 가지는 아크고장 전류의 고유 특징까지 제거될 우려가 있으며, 파형의 왜곡, 위상의 변화를 유발시킬 가능성이 높다[13]. 따라서 본 논문에서는 기존의 논문[13]에서 제시된 최대치 변화율, 실효치 변화율에 잡음량 변화율, shoulder 변화율을 추가하고 그림 7과 같은 알고리즘을 개발하여 분석하였다.

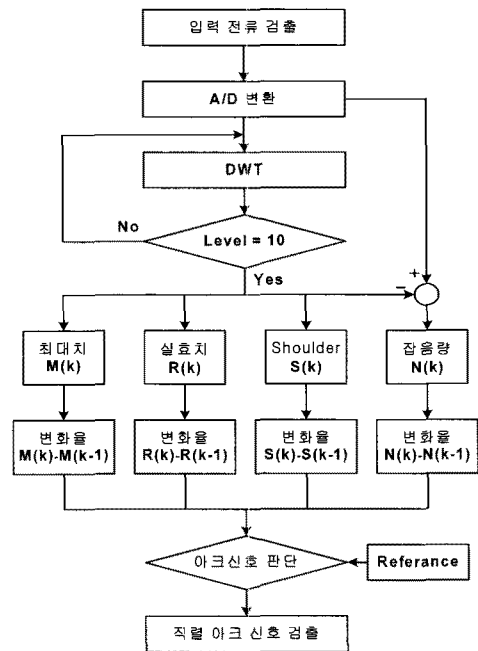


그림 7 아크고장 검출 알고리즘  
Fig. 7 Algorithm for series arc-fault detection

측정된 원 신호를  $x(t)$ 라 하면, 이산 신호  $X[n]$ 은 식 (9)와 같다. 여기서 한주기 샘플링 개수  $N$ 은  $N=T_{AC}/2$ ,  $0 \leq nT_s < N$  이고,  $t = nT_s$ 이다.

$$X[n] = x(nT_s) \tag{9}$$

여기서,  $n$ 은 상수이고  $T_s$ 는 Sampling time이며  $0.2 \mu s$ 이다. 즉, 웨이블릿 변환 트리의 최상위 신호는 0~5 MHz의 주파수 구간이 된다. 원 신호는 이산 웨이블릿 변환에 의하여 저주파수와 고주파수로 분해되어 주파수가 1/2씩 감소하고

레벨 10까지 계속되며, 레벨 10의 저주파수(Approximation) 구간은 0~4.883 ㎐가 된다.

각 측정과정의 반주기에 대한 정상신호와 아크고장 신호는 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$X_k[n]_{arc} = x(knT_s)_{arc} = x(t)_{arc} \quad (10)$$

$$X_k[n]_{normal} = x(knT_s)_{normal} = x(t)_{normal} \quad (11)$$

최대치, 실효치, Shoulder의 길이 변화는 식 (12)~식 (14)와 같고 잡음량의 변화는 식 (15)과 같이 A/D 변환한 신호와 이산 웨이블릿 변환 신호의 차로 구한다.

$$M(k) = \frac{\max\{|X_k[n]|_{arc}\}}{\max\{|X_k[n]|_{normal}\}} \quad (12)$$

$$R(k) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \{X_k[n]\}_{arc}^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \{X_k[n]\}_{normal}^2}} \quad (13)$$

$$S(k) = \frac{\sum_{n=0}^N a_k(n)_{arc}}{\sum_{n=0}^N a_k(n)_{normal}} \quad (14)$$

여기서,  $a_k(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} a_k(n) = 1, & X_k[n] \leq \frac{1}{20} \max\{|X_k[n]|_{normal}\} \\ a_k(n) = 0, & X_k[n] > \frac{1}{20} \max\{|X_k[n]|_{normal}\} \end{cases}$$

$$N(k) = \frac{\sum_{n=0}^N \{|X_k[n] - W_k[n]\}_{arc}}{\sum_{n=0}^N \{|X_k[n] - W_k[k]\}_{normal}} \quad (15)$$

이때, 최대치 변화율은  $\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} [|M(k) - M(k-1)|]$ 로 계산되고, 실효치, shoulder, 잡음량 변화율도 같은 방법으로 계산된다.

### 5.2 직렬 아크고장 검출 결과 및 고찰

가정용 부하 8종의 정상전류와 직렬 아크고장 전류를 각각 30회씩 측정하고 각각의 주기 당 최대치 변화율, 실효치 변화율 및 잡음량 변화율, shoulder 변화율을 정상전류의 상대적 값으로 변환하여 그 결과를 그림 8에서 그림 11까지 나타내었다. 그림 8 ~ 그림 11에서 사용한 L1 ~ L8은 그림 6에서 제시된 부하의 종류를 나타낸다.

그림 8의 최대치 변화율은 L1, L2, L5가 높게 나타나고 있으며 L3, L6, L8은 거의 0에 근접해 있다. 직렬 아크고장 발생을 검출하기 위한 아크고장 판단기준을 0.1로 하였을 경우 아크검출 확률은 L1-97%(29개), L2-93%(28개), L5-97%(29개)이다. 즉 L1, L2, L5 부하는 최대치 변화율을 사용하여 직렬 아크고장을 검출할 수 있으며, 그 이외의 부하는 최대치 변화율로 직렬 아크고장을 검출하기가 어렵고,

특히 L3, L6, L8 부하는 최대치의 변화율로 직렬 아크고장을 검출할 수 없다.

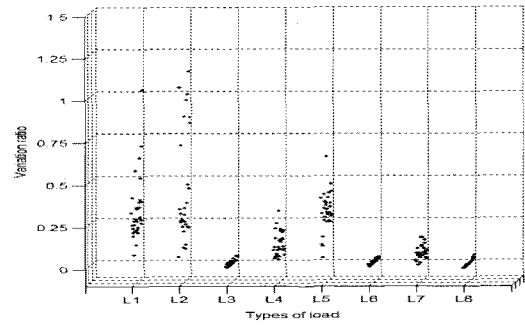


그림 8 최대치 변화율  
Fig. 8 Variation rate of peak

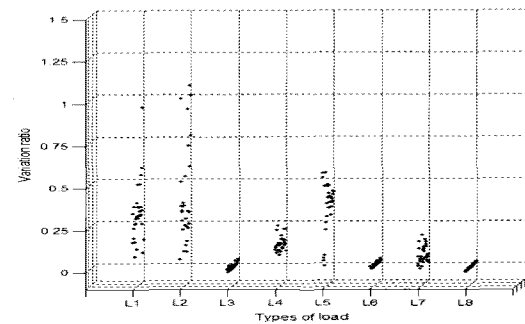


그림 9 실효치 변화율  
Fig. 9 Variation rate of RMS

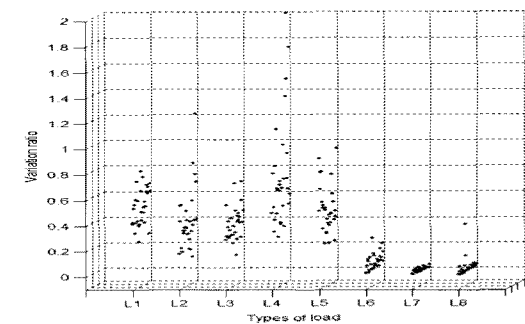


그림 10 잡음량 변화율  
Fig. 10 Variation rate of noise

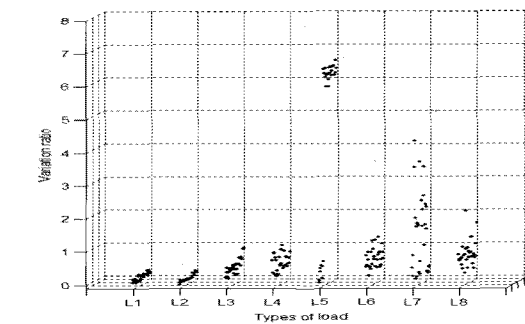


그림 11 shoulder 변화율  
Fig. 11 Variation rate of shoulder

그림 9의 실효치 변화율은 L1, L2, L5가 높게 나타나고 있으며 L3, L6, L8은 거의 0에 근접해 있다. 아크고장 판단 기준을 0.1로 하였을 경우 아크검출 확률은 L1-93%(28개), L2-93%(28개), L5-87%(26개)이다. 즉 L1, L2, L5 부하는 실효치 변화율을 사용하여 직렬 아크고장을 검출할 수 있으며, 그 이외의 부하는 실효치 변화율로 직렬 아크고장을 검출하기가 어렵고, 특히 L3, L6, L8 부하는 실효치의 변화율로 직렬 아크고장을 검출할 수 없다.

그림 10의 잡음량 변화율은 L1, L2, L3, L4, L5가 높게 나타나고 있으며 L6, L7, L8은 낮은 값을 나타내고 있다. 아크고장 판단기준을 0.1로 하였을 경우 아크검출 확률은 L1, L2, L3, L4, L5가 모두 0.1을 초과하여 100%의 검출 확률을 갖는다. 즉 L1, L2, L3, L4, L5 부하는 잡음량 변화율을 사용하여 직렬 아크고장을 검출할 수 있으며, 그 이외의 부하는 잡음량의 변화율로 직렬 아크고장을 검출할 수 없다.

그림 11의 shoulder 변화율은 L3, L4, L5, L6, L7, L8이 높게 나타나고 있으며 L1, L2은 낮은 값을 나타내고 있다. 아크고장 판단기준을 0.1로 하였을 경우 아크검출 확률은 L5-97%(29개)이며 L3, L4, L6, L7, L8은 100%의 검출 확률을 갖는다. 즉 L3, L4, L5, L6, L7, L8 부하는 shoulder 변화율을 사용하여 직렬 아크고장을 검출할 수 있으며, 그 이외의 부하는 shoulder의 변화율로 직렬 아크고장을 검출할 수 없다.

직렬 아크고장신호 분석결과 가정용 부하는 저항성 부하, 자동역률개선회로(PFC : Power Factor Correction)가 포함되어 있는 부하, PFC가 포함되어 있지 않은 부하로 분류할 수 있고, 분류한 3가지 형태에 따라 직렬 아크고장 전류 특성이 유사하게 나타남을 알았다. 따라서 가정용 부하에서 나타나는 직렬 아크고장은 분류한 3가지 형태에 따라 그 특성을 정의하고 검출하여야 한다. 표 1은 그림 8에서 11까지의 데이터를 평균한 값을 나타내며, 표 2는 부하의 종류에 따라 직렬 아크고장을 검출하기 위한 항목과 판별 기준치(threshold)를 0.1로 선정할 경우, 직렬 아크고장을 검출할 수 있는 확률을 나타낸 표이다.

표 1 직렬 아크고장 전류 변화율 평균

Table 1 Average value of the variation ratio of the arc-fault current

부하의 종류	변화율				부하 분류
	최대치	실효치	잡음량	shoulder	
컴퓨터(L1)	0.3320	0.3248	0.5187	0.1261	PFC 무
텔레비전(L2)	0.4366	0.4223	0.4094	0.0747	PFC 무
형광램프(L3)	0.0152	0.0139	0.3890	0.4265	PFC 유
냉장고(L4)	0.1257	0.1465	0.7592	0.5558	PFC 유
CFL 램프(L5)	0.3169	0.3675	0.5052	4.6758	PFC 무
가정용히터(L6)	0.0177	0.0203	0.0858	0.6775	저항성
전자렌지(L7)	0.0722	0.0779	0.0229	1.4392	PFC 유
백열램프(L8)	0.0075	0.0061	0.0452	0.8220	저항성

표 2 직렬 아크고장 전류 검출 확률

Table 2 The probability of series arc-fault current detection

부하의 종류	검출 확률 (%)				비고
	최대치	실효치	잡음량	shoulder	
컴퓨터(L1)	97	93	100	-	
텔레비전(L2)	93	93	100	-	
형광램프(L3)	-	-	100	100	
냉장고(L4)	-	-	100	100	
CFL 램프(L5)	97	87	100	-	
가정용히터(L6)	-	-	-	100	
전자렌지(L7)	-	-	-	100	
백열램프(L8)	-	-	-	100	

개인용 컴퓨터와 텔레비전, CFL 램프는 그림 6(a), 6(b), 6(e)의 파형과 표 1의 결과에 따라 PFC가 포함되어 있지 않은 부하라 할 수 있다. 이러한 부하는 최대치, 실효치, 잡음량의 변화가 크게 나타나며 shoulder의 변화는 미소하게 나타난다. 즉, 부하기기 내부에 PFC 회로가 없는 부하에서 발생하는 직렬 아크고장 전류의 검출은 최대치, 실효치, 잡음량의 변화율로 검출함이 타당하다. 그러나 부하기기 내부에 PFC 회로가 포함된 형광램프, 냉장고, 전자렌지는 최대치 및 실효치의 변화가 거의 없으나, 잡음량과 shoulder의 변화가 크게 나타난다. 즉, 부하기기 내부에 PFC 회로가 포함된 부하에서 발생하는 직렬 아크고장 전류의 검출은 잡음량 또는 shoulder의 변화율로 검출함이 타당하다. 전자렌지의 경우에는 부하기기 내부에 포함된 PFC의 성능이 우수하여 잡음량의 변화가 미소하게 나타나는 것으로 판단되며, 이러한 기기는 shoulder의 변화량으로 판단하여야 한다. 또한 가정용 히터와 백열 램프와 같이 저항성 부하에서는 최대치, 실효치, 잡음량의 변화가 거의 없으며 shoulder의 변화만이 나타나고 있어 직렬 아크고장 전류의 검출은 shoulder의 변화율로 검출하여야 한다.

6. 결론

본 논문은 전기화재를 예방하기 위하여 일반 가정에서 사용되고 있는 부하기기를 대상으로 직렬 아크고장 신호를 분석하였다. 직렬 아크고장 신호를 검출하기 위하여 이산 웨이블렛 변환의 근사계수(approximation coefficient)를 이용하였고, 아크고장 신호 검출 확률을 높이기 위하여 기존에 제시된 방법에 잡음량 변화율과 shoulder 변화율을 추가하였다. 각각의 부하기기에서 발생하는 직렬 아크고장 신호의 최대치 변화율, 실효치 변화율, 잡음량 변화율, shoulder 변화율을 계산하고 발생분포를 분석하였으며, 분석결과에 따라 직렬 아크고장 신호 검출을 위한 판별 기준치(threshold)를 결정하였다. 본 논문에서 제시한 판별 기준치 0.1에 따라 일반 가정의 부하기기 전원선에서 발생하는 직렬 아크고장 신호를 검출한 결과 90% 이상의 검출확률을 얻을 수 있었다.

직렬 아크고장 신호를 효율적으로 검출하기 위하여 실험에 사용된 부하기기를 입력전류의 형태 및 직렬 아크고장 전류 형태에 따라 3가지로 분류하였다. 즉, 부하기기 내부에

PFC가 포함되어 있는 기기, PFC가 포함되어 있지 않은 기기, 저항성 부하기기로 분류하였다. 부하기기 내부에 PFC가 포함된 형광램프, 냉장고, 전자렌지는 잡음량 변화율 또는 shoulder 변화율로 직렬 아크고장 신호를 검출하여야 하고, PFC가 포함되어 있지 않은 개인용 컴퓨터, 텔레비전, CFL 램프는 최대치 변화율, 실효치 변화율, 잡음량 변화율로 직렬 아크고장 신호를 검출하여야 하며, 일반적인 저항성 부하인 가정용 히터와 백열램프는 shoulder의 변화율로만 직렬 아크고장 신호를 검출하여야 한다. 즉, 부하기기의 입력전류 형태에 따라 발생하는 직렬 아크고장 신호의 형태는 상이하므로, 검출 항목을 다르게 적용하여야 함을 알 수 있다.

**참 고 문 헌**

[1] 산업자원부, “전기화재통계분석”, 2007.  
 [2] A.F. Sultan, G.W. Swift, D.J. Fedirchuk, “Detecting Arcing Downed-Wires Using Fault Current Flicker And Half-Cycle Asymmetry”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, Page(s) 461~470, Jan. 1994.  
 [3] C. Benner, P. Carswell, B.D. Russell, “Improved Algorithm For Detecting Arcing Faults Using Random Faults Behavior”, Electric Power System Research, Vol. 17, pp. 49~56, 1989.  
 [4] S.J. Balsler, K.A. Clements, D.J. Lawrence, “A Microprocessor-Based Technique For Detection of High Impedance Faults”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, Jul. 1986.  
 [5] D.I. Jeerings, J.R. Linders, “Unique Aspects of Distribution System Harmonics Due to High Impedance Ground Faults”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, Apr. 1990.  
 [6] B.D. Russell, R.P. Chinchali, C.J. Kim, “Behavior of Low Frequency Spectra During Arcing Fault And Switching Events”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oct. 1988.  
 [7] B.D. Russell, R.P. Chinchali, “A Digital Signal Processing Algorithm For Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, Jan. 1989.  
 [8] B.M. Aucoin, B.D. Russell, “Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components”, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No. 6, Jun. 1982.  
 [9] Wen-Jun Li, Yuan-Chun Li, “Arc Fault Detection based on Wavelet Packet”, Proceedings of FICML, pp. 18~21, Aug., 2005.  
 [10] W. Charytoniuk, W. J. Lee, M. S. Chen, J. Cultrera, T. Maffetone, “Arcing Fault Detection in Underground Distribution Networks Feasibility Study”, Industry Applications, IEEE Transaction, Vol. 36, No. 6, pp. 1756~1761, Nov., 2000.

[11] A. Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, L. A. Leturiondo, “Evaluation of A New proposal for Arcing Fault Detection Method Based on Wavelet Packet Analysis”, Power Engineering Society Meeting, Vol. 3, pp. 1328~1333, July, 2001.  
 [12] Nagy I. Elkalashy, Matti Lehtonen, Hatem A. Darwish, Mohamed A. Izzularab, Abdel Maksoud I. Taalab, “Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 2, pp. 375~383, April, 2007.  
 [13] 방선배, 박종연, “웨이블렛 변환을 이용한 직렬 아크 고장 신호 분석”, 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 3, pp. 494~500, Mar, 2008.  
 [14] 기술표준원, “KS C 4613 누전차단기”, 2002.  
 [15] George D. Gregory, Kon Wong, Robert Dvorak, “More about Arc-Fault Circuit Interrupter”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, pp. 1006~1011, July/Aug., 2004.  
 [16] George D. Gregory, Gary W. Scott, “The Arc-Fault Circuit Interrupter, An Emerging Product”, Power Systems Technical Conference IEEE, pp. 48~55, May, 1998.  
 [17] Underwrites Laboratories Inc. UL1699, “Arc-Fault Circuit-interrupters”, May, 2003.

**저 자 소 개**



**방 선 배 (方 善 培)**

1968년 5월 18일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 강원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동대학원 박사수료. 2003년~현재 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : 031-580-3074  
 E-mail : bimil5018@naver.com



**박 종 연 (朴 鍾 演)**

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 동대학원 졸업(박사). 1973~1977년 KIST 연구원. 1977~1984년 울산 공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대학교 IT특성화대학 전기전자정보통신공학부 교수.



**장 목 순 (張 牧 淳)**

1966년 10월 25일생. 1992년 강원대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998~2005년 University of Toronto, Electric Power Group 선임 연구원. 2006~현재 강원대학교 전기공학과 강사. (주)올라이트라이프 연구소장.



**최 원 호 (崔 原 豪)**

1977년 1월 2일생. 2002년 강원대학교 전기공학과 졸업, 2004년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2008년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 2007년 ~ 현재 (주)아이티파워 대표이사