

Analysis of Series Arc-Fault Signals Using Wavelet Transform

方善培[†] · 朴鍾演^{*}

(Sun-Bae Bang · Chong-Yeun Park)

Abstract - This paper presents the analyzed result of the series arc fault current by using the discrete wavelet transform. The series arcing is caused by a loose connection in series with the load circuit. The series arc current is limited to a moderate value by the resistance of the device connected to the circuit, such as an appliance or a lighting system. The amount of energy in the sparks from the series arcing is less than in the case of parallel arcing but only a few amps are enough to be a fire hazard. Therefore, it is hard to detect the distinctive difference between a normal current and a intermittent arc current. This paper, presents the variation of the ratio of peak values and RMS values of the series arc fault current, and proposes the novel series arc fault detecting method by using the discrete wavelet transform. Loads such as a CFL lamp, a vacuum cleaner, a personal computer, and a television, which has the very similar normal current with the arc current, were selected to confirm the novel method.

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

1. 서 론

전기에너지의 이용이 증가함에 따라 전기화재, 감전, 설비 사고 등과 같은 전기 재해도 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따라 방지대책에 관하여도 많은 연구가 진행되고 있는 추세이다. 최근에는 화재, 감전 사고를 미연에 방지하기 위하여 GFCI(Ground Fault Circuit Interrupter)와 AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter)와 같은 화재, 감전사고 방지 장치에 관한 연구와 개발이 진행되어 전기안전에 대비하고 있으나 계속적으로 전기화재는 발생되고 있다. 아크에 의해 발생하는 전기화재의 경우 미국 소비자 제품 안전 위원회(Consumer Product Safety Commission)에 의하면 전체 전기화재의 40%를 차지하고 있다.[1] 전기화재 점화를 가능하게 하거나 화재 점화 조건이 되는 아크는 절연 매질이 전기적으로 관통되어 발생하는 지속적인 발광 방전 현상이다. 이러한 현상을 검출하여 회로를 분리시켜 주는 장치인 AFCI는 정상 전류와 아크고장 전류의 차이를 이용하여 아크를 감지한다. 이때, 정상전류에는 스위칭에 의한 아크와 부하의 기동, 점등 시 발생하는 과도현상 전류를 포함하는데 그 형상이 비슷하여 아크고장 신호와의 구별이 매우 어렵다. 또한 아크고장의 종류 중 직렬 아크 고장은 아크로 인한 전류의 변화가 극히 미미하여 더욱 검출이 어렵다. 이러한 이유로 최근까지 아크고장 전류와 정상전류를 구분할 수 있는 특성분석 및 그 검출 방법에 대하여 지속적인 연구가 진행되고 있

다.[1,2]

직렬 아크고장 전류는 부하에 따라 그 경향이 변화하지만 일반적으로 최대치가 일정치 않으며 저항 부하에서는 shoulder가 존재하고 고주파 잡음과 형상이 나타나는 것으로 알려져 있다. 그러나 직렬 아크고장 전류는 아크 발생면의 형태, 발생면의 종류, 연결 부하의 종류에 따라 매우 큰 변화를 가지기 때문에 지금까지 직렬 아크고장 전류의 특징들은 수치적으로 정량화하지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 일반 가정에서 많이 사용하고 있는 부하들 중 특히 비선형 부하들을 대상으로, 부하기기의 배선에서 발생하는 직렬 아크고장 전류를 추정 분석하고, 아크고장 검출장치의 아크 관별기준으로 사용할 수 있도록 그 특성을 수치적으로 정량화하는 방법과 아크고장 검출 적용 가능성을 제시하였다. 분석 방법은 이산 웨이블릿 변환의 근사화 기법을 적용하여 직렬 아크고장 전류로부터 아크로 인한 빠른 과도 변화 분을 분리하고 부하에 따른 아크고장 신호의 특성 중 최대치의 변화율과 실효치의 변화율을 수치화하며 정상상태에서의 그것들과 비교하는 방법을 사용한다.

2. 이산 웨이블릿 변환

최근까지 아크고장과 검출에 관한 연구는 많은 연구자들의 연구 대상이 되고 있다. 시간영역에서의 아크 검출 알고리즘은 아크전류 파형의 형태와 아크발생 현상에 근거하여 제안되었고[3][4], 주파수 영역에서는 푸리에 변환을 사용하여 고조파 성분 분석[5-8], 내부고조파(inter-harmonic) 성분 분석[9], 고주파수 성분 분석[10] 방법 등을 사용하는 알고리즘이 제안되었으며, 또한 아크고장 전류의 에너지 변화와 관

[†] 교신저자, 正會員 : 電氣安全研究院 先任研究員

E-mail : bsb1586@kesco.or.kr

^{*} 正會員 : 江原大學 電氣·電子工學科 教授

接受日字 : 2007年 12月 12日

最終完了 : 2008年 1月 29日

련된 알고리즘도 제안되었다.[11-12] 제안된 알고리즘의 대부분은 시간적으로 정상 조건에 대한 아크 고장 신호를 차별화하는 방법을 사용한다. 최근에는 아크고장 전류의 특이한 현상의 발견과 좀 더 선택적인 검출 목적의 필요성으로 인하여 순간적으로 발생하는 아크고장 전류의 특징과 주파수 특징을 조합한 시간-주파수 영역에서 분석이 가능한 웨이블릿 변환 방법을 많이 사용하고 있다.[11-15] 웨이블릿 변환 방법을 사용하는 기존의 논문에서는 가정이나 건물 구내에서 발생하는 아크가 아닌 배전 및 간선계통에서의 계통 보호를 목적으로 아크를 검출하는 것이 대부분으로 아크고장의 발생 시점을 중요시하며, 대부분 저항성 부하만을 이용하고 있다.[14][15] 그러나 본 논문에서는 기존의 논문과 다른 가정이나 건물 구내의 저압 분기 선로에서 부하의 종류에 따라 그 형태가 상이한 직렬 아크고장 신호 검출을 목적으로 아크의 발생 시점뿐만 아니라 아크고장 전류의 형태 변화를 웨이블릿 변환의 근사(Approximation) 계수를 이용하는 새로운 분석 방법을 사용하였다. 기존의 논문에서는 아크신호 분석을 위하여 웨이블릿 변환의 상세(Detail) 계수를 이용하고 있으며, 대용량 대전류 아크고장 신호 분석이 대부분이다.

웨이블릿 변환은 연속 웨이블릿과 이산 웨이블릿으로 나누어진다. 연속 웨이블릿 변환은 비정상신호(non-stationary signal), 광대역신호(wideband signal) 등의 스케일 특성 표현 및 분석에 유용하게 사용되는 시간-주파수(time-frequency), 시간-스케일(time-scale) 변환이며, 이산 웨이블릿 변환은 스케일 함수와 이로부터 구해진 웨이블릿을 이용하고 필터 뱅크 이론에 기초한 신호의 데이터 프로세싱 및 분석을 위한 시간-스케일 변환이다.[13][15]

일반적으로 이산 웨이블릿 변환은 다해상도 분석방법을 사용하며 그림 1과 같은 분해(decomposition) 트리구조를 갖는다. 입력신호 S 는 웨이블릿을 기저로 하는 저역통과 필터를 적용하여 근사 성분에 해당하는 근사 계수 A_1 을 얻고, 웨이블릿을 기저로 하는 고역통과 필터를 적용하여 상세 성분에 해당하는 상세 계수 D_1 을 얻으며, 그 다음 단계에서는 근사 계수에 대해서만 저역통과 필터 및 고역통과 필터를 적용하는 트리구조를 갖는다.[15]

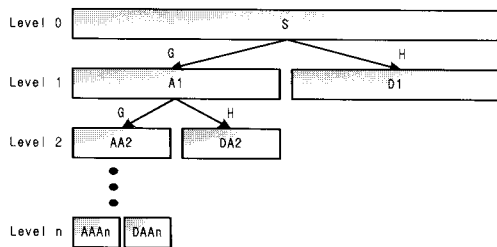


그림 1 이산 웨이블릿 변환 분해 트리구조
Fig. 1 Decomposition tree of a signal by discrete wavelet

선형 대수학적 관점에서 이산 웨이블릿 변환의 계산은 입력 신호 벡터 x 가 $x = \{x_n\} = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$ 일 때, $N/2$ 개의 스케일링 계수값(평균값)과 $N/2$ 개의 웨이블릿 계

수값을 구한다. 여기서 R^2 기저를 갖는 웨이블릿의 경우 스케일링 계수값(평균값) a_i 와 웨이블릿 계수값 c_i 는 식 (1)과 같다.

$$a_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}, c_i = \frac{x_i - x_{i+1}}{2} \quad (1)$$

첫 번째 스케일링 계수는 입력신호와 크기가 같은 스케일링 벡터 $[h_0, h_1, 0, 0, \dots, 0]$ 와 입력신호 $[x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}]$ 의 내적에 의하여 계산되고, 첫 번째 웨이블릿 계수는 웨이블릿 벡터 $[g_0, -g_1, 0, 0, \dots, 0]$ 와 입력신호의 내적에 의하여 계산된다. 두 번째의 스케일링 계수와 웨이블릿 계수는 스케일링 벡터와 웨이블릿 벡터의 전이(shifting)에 의해 구해진다. 그러므로 스케일링 계수값 a_i 와 웨이블릿 계수 c_i 는 스케일링 함수 계수 h_i , 웨이블릿 함수 계수 g_i 와 입력 신호 x 내적에 의하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} a[i] &= h_0 x[2i] + h_1 x[2i+1] + h_2 x[2i+2] + \dots \\ c[i] &= g_0 x[2i] + g_1 x[2i+1] + g_2 x[2i+2] + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

본 논문에서는 가정용 부하 4종류에 대하여 정상전류와 아크고장 전류를 부하별로 20회씩 측정하고 웨이블릿 변환의 근사화 기법을 이용하여 측정된 전류로부터 아크에 의한 빠른 변동 성분을 원 신호로부터 분리하는 방법을 사용하였다. 이산 웨이블릿 변환의 기저로 사용한 모 웨이블릿은 그 종류가 다양하나 Li[13]와 Charytoniuk[14]의 연구 결과와 같이 직렬 아크고장 신호 분석에 적합한 Daubechies 10을 적용하였고, 레벨 깊이는 전류의 최소 및 최대치를 분석하기 위하여 원 신호가 왜곡되지 않고 노이즈 및 펄스 신호가 원 신호보다 작아지도록 하기 위하여 레벨 10으로 선정하였다.

3. 가정용 부하의 직렬 아크고장 신호 검출

3.1 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 주울열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이러한 열은 전기화재의 원인이 된다.[2]

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 흘러들어가는 구조로 되어 있는데 전기 도선의 종류, 도선의 단면적, 또는 전류, 전압의 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 2는 가정용 부하의 저압 배선에서 발생하는 4가지 형태의 아크고장을 나타낸다.[1][2]

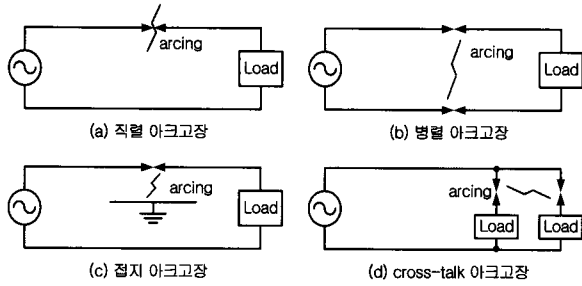


그림 2 아크고장의 분류
Fig. 2 Classification of arc-fault types

그림 2(a)는 직렬 아크고장이며 부하와 직렬로 연결된 하나의 도선에서 발생하고, 전원선의 단선, 반 단선 또는 접속 기구에서 전선이 느슨하게 연결될 경우 발생한다. 그림 2(b)는 병렬 아크고장이며, 서로 다른 두 개의 극성을 갖는 전선에서 발생하고 대 전류가 발생하는 특징이 있다. 그림 2(c)는 도선을 보호하고 있는 전선의 절연체가 파손되어 전원선과 대지 사이에서 발생하는 접지 아크고장이며, 그림 2(d)는 부하의 전원선과 다른 전원선 사이에서 발생하는 cross-talk 아크고장이다.[1][2]

본 논문에서는 기존의 차단기로는 검출이 어려워 전기화재 발생 위험이 높은 직렬 아크 고장전류에 대하여 분석하였다. 직렬 아크 고장 전류는 비선형 부하전류와 그 형태가 거의 동일하여 기존의 차단기로는 검출이 어렵다. 그림 3은 전형적인 직렬 아크고장 전압·전류 파형이며, 직렬로 저항 부하를 연결하고 UL1699의 규정에 의한 아크방전 발생기에 의해 아크고장을 발생시켰을 경우 나타나는 전압·전류 파형이다.[16]

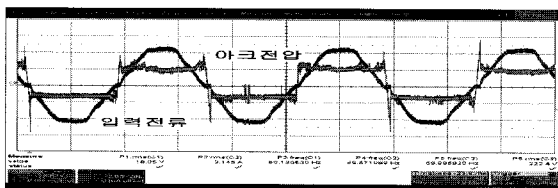


그림 3 저항부하일때의 아크고장 전압·전류 특성
(20 V/div., 2 A/div.)
Fig. 3 Generalized arc characteristics with resistive loads

아크 전압의 주기는 부하전류와 동일한 주기로 발생되며 부하전류의 크기, 아크 발생조건 등에 따라 크기가 변화한다. 정상에서는 나타나지 않는 전압이다. 즉, 직렬로 연결된 도선 간 전압과 그림 3의 전압을 비교할 수 있으므로 그림 3의 아크고장 전압으로서 아크고장 발생의 유, 무를 쉽게 알아낼 수 있다. 그러나 아크 전압은 아크가 발생한 지점의 양단에서 측정하여야 하는데 아크 발생 위치를 미리 예측할 수 없으므로 검출기에 적용하려는 기준으로는 적합지 않다. 그러므로 아크 검출기는 아크고장 전류로만 아크의 발생 유, 무를 판별해야 한다.[15]

직렬 아크고장 전류는 부하 임피던스와 아킹 임피던스가 더해진 상태에서 흐르는 전류로 결정되고 그 크기가 정상적인 부하전류와 비슷하거나 작으며, 아크 전압의 극성이 변화되는 순간, 즉 영점에서 아크고장 전류가 소멸되었다가 다시 나타나는 shoulder(extinction and re-ignition) 현상이 발생되는 특성을 갖는다.[13-15]

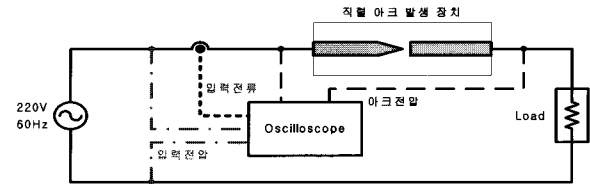


그림 4 직렬 아크고장 전류 검출 시스템
Fig. 4 Detection system of series arc-fault current

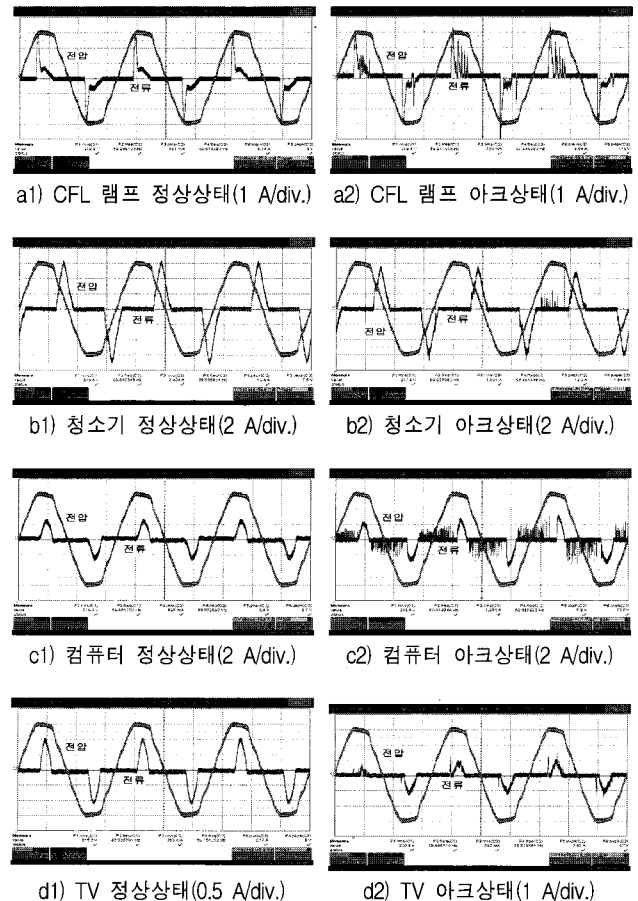


그림 5 가정용 부하의 정상상태와 아크고장상태 전압·전류 파형(100 V/div.)

Fig. 5 Voltage and current waveforms at the normal state and the arc state with home appliances

3.2 직렬 아크고장 신호 검출

기존의 논문들에서도 직렬 아크고장 신호를 검출하기 위하여 부하전류의 변화 추이, shoulder의 존재, 전류 진폭의 변화 등을 이용하고 있으나 전원전압의 변동, 부하의 상태,

아크고장 발생조건 등의 변화로 인하여 정상전류와 아크고장 전류의 차이를 정확히 구분하기가 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 정상전류와 직렬 아크고장 전류를 측정하고 웨이블릿 변환의 근사화 기법을 이용하여 빠른 변화분을 분리함으로써 아크고장 전류의 특성 분석을 더 쉽게 수행하는 방법을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 부하는 입력전류의 형상이 저항 부하에서 나타나는 아크고장 전류와 유사한 비선형성 부하인 가정용 CFL 램프, 개인용 컴퓨터, 청소기, 텔레비전을 사용하였으며, 그림 4와 같이 시스템을 구성하고 각각의 부하에서 정상전류와 아크고장 전류를 20회씩 측정하였다. 그림 5는 각 부하에서 측정한 정상전류와 아크고장 전류 파형의 일례이다.

4. 아크 고장 전류의 정량적 분석

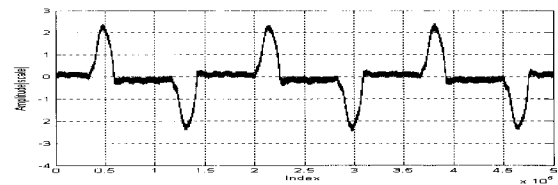
4.1 정량적 분석 방법

직렬 아크고장 전류는 부하의 특성에 의해 나타나는 전류 형태를 유지하며, 직렬 아크저항 성분에 의해 일반적으로 부하 전류보다 작은 전류를 갖는 것으로 알려져 있다. 또한 최근에 많이 사용되는 비선형 부하들의 전류는 그림 5(a), 5(b), 5(c), 5(d)와 같이 shoulder가 포함되어 있음에 따라 직렬 아크고장 전류와 비슷한 형태의 모양을 갖기 때문에 shoulder의 유, 무로서 아크를 판별하는 방법은 사용할 수 없다. 그러나 주기에 따라 최대치가 변화하고 shoulder 부근에 서지(surge)성 파형이 포함되는 특징을 가진다. 따라서 직렬 아크고장 전류와 정상전류의 차이를 정확히 검출하기 위해서는 전류의 형태뿐만 아니라 주기적인 변화를 정확히 파악하는 것이 더욱 중요하다. 그러나 직렬 아크고장 전류는 아크현상에 의한 크기 변화가 매우 급격하고 심한 고주파 노이즈를 포함하고 있기 때문에 직접적인 분석은 매우 큰 오차를 유발할 가능성이 높다. 그러므로 아크로 인한 급격한 크기 변화와 고주파 노이즈를 분리하고 분리된 고주파 잡음을 제거하는 것이 아크 검출에 있어 매우 중요한 사항이다. 이때 고주파 잡음을 제거하기 위한 저역 통과 필터의 사용은 과도 주파수영역의 폭이 비교적 길고 위상오차를 가지기 때문에 급격한 크기 변화를 가지는 아크고장 전류의 고유 특징까지 제거할 우려가 있으며, 파형의 왜곡, 위상의 변화를 유발시킬 가능성이 높다. 따라서 본 논문에서는 가정용 부하 4종류의 정상전류와 아크고장 전류를 측정하여 이산 웨이블릿 변환의 근사화 기법을 이용하여 레벨 10까지 변환한 결과인 Approximation coefficient를 역변환 함으로써 아크로 인한 서지(surge)성 파형의 빠른 변동분을 제거하고 최대치의 변화와 실효치의 변화를 분석하여 정상전류와의 변화 차이를 비교하였다.

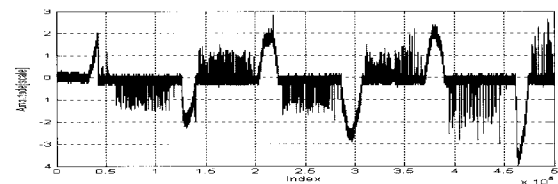
그림 6(a)는 개인용 컴퓨터의 정상전류이다. 역률개선회로가 포함되지 않은 SMPS이기 때문에 전형적인 비선형 특성이 나타나고 있으며, 고조파가 많이 포함된 상태를 나타내고 있다. 그림 6(b)는 개인용 컴퓨터를 부하로 한 상태에서 직렬 아크고장 전류를 측정한 것이다. 대부분의 비선형 부하에서 발생하는 직렬 아크고장 전류들은 이와 비슷한 형태의 특징들을 가지고 있으며 이 특징들을 정리하면 다음과 같다.

- 최대치(peak)가 변화한다.
- 전류의 상승비가 변화한다.
- 전류의 실효치가 변화한다.
- 고주파수 노이즈가 아크전류에 나타난다.
- 아크 전류의 상승률은 정상 전류의 상승률보다 크다.
- 아크는 산발적으로 발생되고, 아크로 인한 서지(surge)성 파형이 산재된 형태로 나타난다.

그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 직렬 아크고장 전류는 고주파 잡음이 파형에 섞여 있음에 따라 직접적으로 shoulder나 최대치, 실효치 등의 값을 알아내기가 어렵다. 그러므로 그림 7(a), (b)와 같이 이산 웨이블릿 변환을 적용하여 잡음을 제거한 파형을 이용하여야 보다 더 정확한 분석이 가능하다.



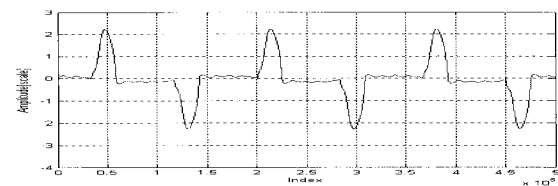
(a) 정상 전류 파형



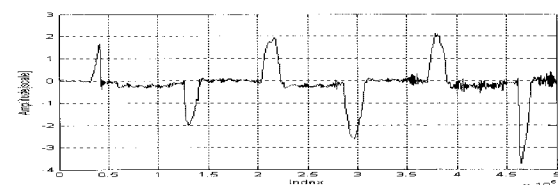
(b) 아크고장 전류 파형

그림 6 컴퓨터의 정상전류 및 아크고장 전류 파형

Fig. 6 Normal current and arc-fault current from personal computer



(a) 웨이블릿 변환을 이용한 정상 전류의 잡음제거 파형



(b) 웨이블릿 변환을 이용한 직렬 아크고장 전류의 잡음 제거 파형

그림 7 웨이블릿 변환을 이용한 컴퓨터의 정상전류 및 아크고장 전류 잡음제거 파형

Fig. 7 De-noised waveform of normal current and arc-fault current from personal computer by using wavelet transform

직렬 아크가 발생하지 않은 경우에 부하로 흐르는 전류의 형태는 주기적이다. 즉, 전류의 최대치나 실효치의 차이는 거의 일어나지 않는다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 직렬 아크고장 전류의 파형은 최대치나 실효치가 주기에 따라 다르게 나타난다. 이러한 특성을 수치적으로 정량화하기 위하여 그림 8에서와 같이 파형의 음극으로 바꾸고 파형을 6등분하여 구간들 사이에서 측정된 최대치와 정상 전류에서의 최대치 차이 값을 얻었다. 얻어진 이 차이 값들을 평균하면 하나의 상수로 나타낼 수 있으며, 이 값은 전류 최대치의 변화로 표현된다. 실효치의 경우에도 같은 방식을 사용하여 변화를 표현할 수 있다.

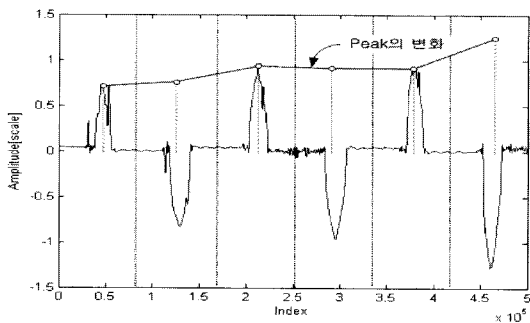


그림 8 최대치의 변화를 정량화 하는 방법
Fig. 8 Method for the figure of the peak change rate

이러한 방법을 사용하여 개인용 컴퓨터의 정상전류를 분석한 결과, 최대치 및 실효치의 변화는 그림 9와 같이 나타나고, 그 값은 거의 0에 근접함을 알 수 있었다. 즉, 각 부하의 정상전류는 최대치나 실효치의 변화가 발생하지 않음을 의미한다.

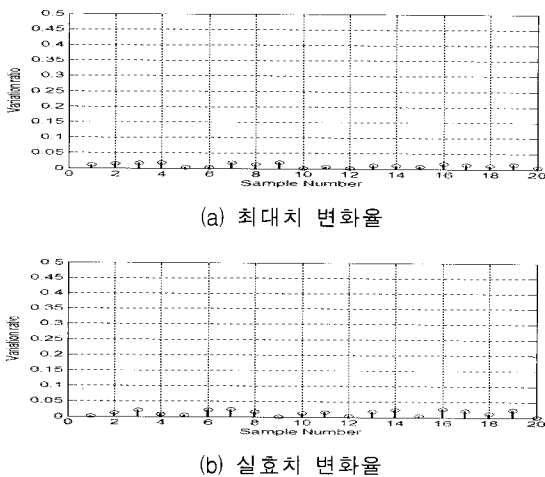


그림 9 개인용 컴퓨터의 정상전류 변화율
Fig. 9 Variation ratio of the normal current from personal computer

이와는 다르게 직렬 아크고장 전류의 경우에는 최대치나 실효치의 변화가 나타난다. 비교의 예로서 그림 6(b)와 같이 개인용 컴퓨터 부하의 직렬 아크고장 전류 파형을 분석한 결과를 그림 10에 나타내었다.

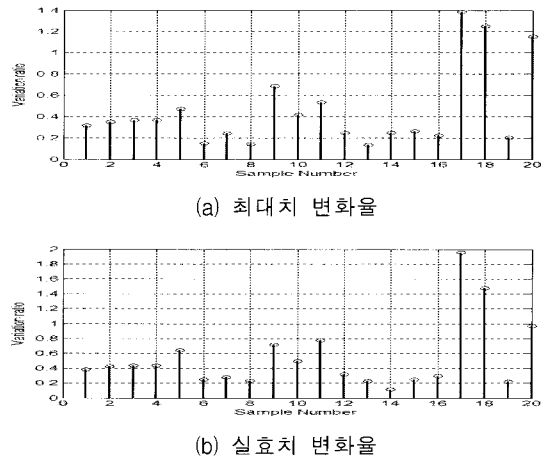


그림 10 개인용 컴퓨터의 아크 고장 전류 변화율
Fig. 10 Variation ratio of the arc fault current from personal computer

이러한 방식을 적용하면, 각 부하의 아크고장 전류와 정상전류의 차이점들을 쉽게 알 수 있다. 그러나 각각의 부하에 따라 전류의 크기가 다르기 때문에 결과로서 나타나는 전류 최대치의 변화 수치는 아크 검출 기준으로 사용될 수 없다. 즉, 변화의 크기는 아크 발생 조건이나 부하의 종류 및 부하용량에 따라 그 변화가 일관되지 않는다. 따라서 일관된 정량적 변화의 크기를 구하기 위하여 정상전류의 최대치에 대한 비율로서 직렬 아크고장 전류의 구간별 최대치를 표시하고, 상대적 최대치들의 변화에 대한 평균을 부하별로 분석하였다. 제안된 방법으로 측정된 직렬 아크고장 전류들을 분석한다면 부하 종류별 정상전류에 대한 직렬 아크고장 전류의 최대치 변화를 관찰 할 수 있다.

4.2 분석 결과

4.1절에서 제시된 방법으로 본 논문에서는 가정용 부하 4종의 정상전류와 직렬 아크고장 전류를 각각 20회씩 측정하고 이들의 주기 당 최대치 및 실효치의 변화를 정상전류의 상대적 값으로 비교하였으며 그 결과를 그림 11에서 그림 14까지 나타내었다.

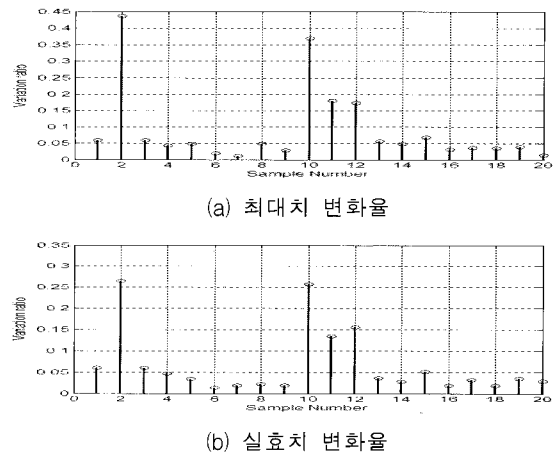
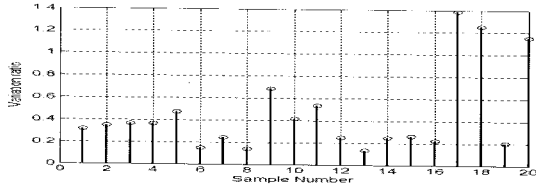
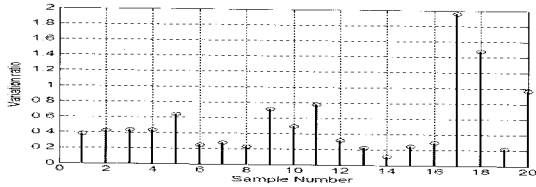


그림 11 청소기의 아크 고장 전류 변화율
Fig. 11 Variation ratio of the arc fault current from vacuum cleane



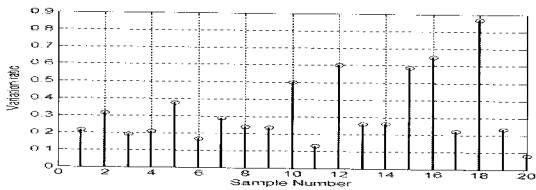
(a) 최대치 변화율



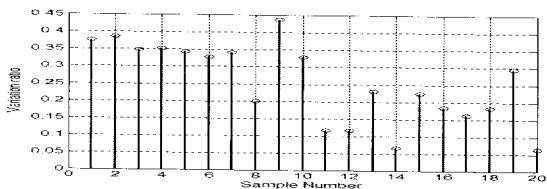
(b) 실효치 변화율

그림 12 개인용 컴퓨터의 아크 고장 전류 변화율

Fig. 12 Variation ratio of the arc fault current from personal computer



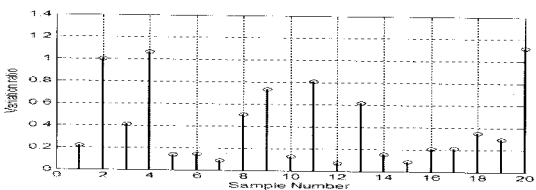
(a) 최대치 변화율



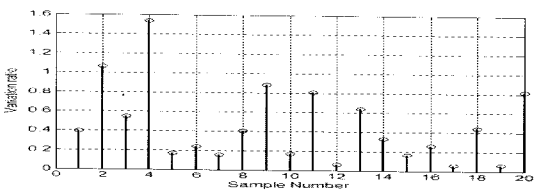
(b) 실효치 변화율

그림 13 CFL 램프의 아크 고장 전류 변화율

Fig. 13 Variation ratio of the arc fault current from CFL lamp



(a) 최대치 변화율



(b) 실효치 변화율

그림 14 텔레비전의 아크 고장 전류 변화율

Fig. 14 Variation ratio of the arc fault current from television

표 1과 표 2는, 부하별로 측정 분석한 20회의 평균값을 나타낸다. 분석 결과, 청소기 부하를 제외한 기타의 부하에서는 정상전류에 대한 아크고장 전류 변화율이 매우 크게 나타나고 있으며, 이들 부하들의 경우에는 0.1 이상의 최대치 변화율 및 실효치 변화율이 발생할 경우, 직렬 아크고장으로 판별할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 청소기 부하의 경우에는 기타 부하들의 경우와 비교하여 최대치 및 실효치 변화가 매우 작기 때문에 직렬 아크 고장 검출이 어려운 단점이 있으며, 이러한 현상은 청소기 부하의 임피던스가 큰 인덕턴스 성분을 갖고 있으므로 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

표 1 직렬 아크 고장 전류의 최대치 변화율 평균

Table 1 Average value of the variation ratio of peak values of the arc fault current

부하의 종류	청소기	컴퓨터	CFL 램프	텔레비전
변화율 평균	0.0900	0.4576	0.3314	0.4176

표 2 직렬 아크 고장 전류의 실효치 변화율 평균

Table 2 Average value of the variation ratio of RMS values of the arc fault current

부하의 종류	청소기	컴퓨터	CFL 램프	텔레비전
변화율 평균	0.0669	0.5444	0.2540	0.4606

5. 결 론

본 논문에서는 가정용 부하에서 발생하는 직렬 아크고장 전류의 특성을 조사하고 아크 검출 장치의 아크 판별 기준으로 사용할 수 있는 특성을 수치적으로 정량화하는 방법과 아크고장 검출 적용 가능성을 제시하였다. 아크 발생 부하로는 일반 가정에서 많이 사용하고 있는 CFL 램프, 청소기, 개인용 컴퓨터, 텔레비전을 대상으로 하였으며, 각각의 부하에 20회씩 직렬 아크고장을 발생시키고 전류전류를 측정하여 분석하였다. 일반적으로 직렬 아크고장이 발생하면 최대치가 일정치 않으며, 전류의 실효치가 감소하고, 저항부하에서는 shoulder가 나타나며, 고주파 잡음과 빠른 형상의 변화가 정상전류에 포함되는 등의 특성이 나타나지만 부하의 종류 및 아크 발생 조건에 따라 그 경향의 변화가 너무 많고 크기 때문에 직렬 아크 고장의 판별 기준에 해당하는 특성들을 수치화하기 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 웨이블릿 변환의 근사화 기법을 적용하여 직렬 아크고장 전류로부터 아크로 인한 빠른 과도 변화 분을 분리하는 방법을 사용하여 부하의 종류에 따른 직렬 아크고장 신호의 특성 중 최대치의 변화와 실효치의 변화를 수치화하여 정상전류에서의 그것들과 비교 분석하였다. 분석 결과 대부분의 가정용 부하기기의 최대치 변화율과 실효치 변화율이 0.1 이상일 때 아크가 발생한 것으로 간주 할 수 있음을 확인하였다. 그러나 청소기 부하의 경우에는 기타 부하들의 경우와 비교하여 최대치 및 실효치 변화율이 매우 작기 때문에 직렬 아크 검출기준은 부하의 종류 및 부하의 특성에 따라 조정되어야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] George D. Gregory, Kon Wong, Robert Dvorak, "More about Arc-Fault Circuit Interrupter", IBBE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, pp. 1006~1011, July/Aug., 2004.
- [2] George D. Gregory, Gary W. Scott, "The Arc-Fault Circuit Interrupter, An Emerging Product", Power Systems Technical Conference IEEE, pp. 48~55, May, 1998.
- [3] 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, pp. 461~470, Jan. 1994.
- [4] 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.
- [5] S.J. Balser, 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.
- [6] Power Technologies Inc., "Detection of High Impedance Faults", EPRI Report EL-2413, Jun. 1982.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K.Y. Lien, S.L. Chen, C.J. Liao, T.Y. Guo, T.M. Lin, and J.S. Shen, "Energy Variance Criterion and Threshold Tuning Scheme For High Impedance Fault Detection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, Jul. 1999.
- [12] W.H. Kwon, G.W. Lee, Y.M. Park, M.C. Yoon and M.H. Yoo, "High Impedance Fault Detection Utilizing Incremental Variance of Normalized Even Order Harmonic Power", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, Jul. 1991.
- [13] Wen-Jun Li, Yuan-Chun Li, "Arc Fault Detection based on Wavelet Packet", Proceedings of FICML, pp. 18~21, Aug., 2005.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Underwrites Laboratories Inc. UL1699, "Arc-Fault Circuit-interrupters", May, 2003.

저 자 소 개



방 선 배 (方 善 培)

1968년 5월 18일생. 1994년 명지대 전기 공학과 졸업. 2002년 강원대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 박사 수료. 2003년~현재 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : 031-580-3074

E-mail : bsb1586@kesco.or.kr



박 중 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 전기전자 정보통신공학부 교수.