이산 웨이블렛 변환을 이용한 직렬 아크고장 신호 검출 방법 분석

논 문
58P-3-21

Analysis of Detection Method for Series Arc Fault Signal by using DWT

방 선 배† · 김 종 민* · 박 종 연** · 정 영 식***
(Sun-Bae Bang · Chong-Min Kim · Chong-Yeun Park · Young-Sik Chung)

Abstract - Electrical fires have been occurred continuously in spite of installing ELB. Therefore the concern with the electrical arc-fault that cause the fire has growing. This paper measured series arc fault currents by the method of arc generator test in UL standard 1699. The used analysis methods in this paper are three different ways using DWT(discrete wavelet transform) those are frequently used for the arc fault current signal analysis. The arc fault detection probability is 100 % by method using noise-energy/shoulder-duration ratio of approximation coefficient. As these results, the variation of noise-energy and shoulder-duration ratio of approximation coefficient are founded important factors for the analysis of arc fault.

Key Words : AFCI, Series Arc-Fault, Wavelet Transform, Electrical Fire

1. 서 론

누전차단기가 100 % 보급된 상황에서도 전기로 인한 화재가 지속적으로 발생하고 있어, 이와 관련한 전기 아크(Arc)에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 1994년, 미국의 주요 재해예방기관인 NFPA(National Fire Protection Association), CPSC(Consumer Product Safety Commiss-ion), UL(Underwriters Laboratories) 등이 합동으로 발표한 전기화재의 원인 규명 조사연구 결과 보고서에 의하면 주택의 전기화재는 40 % 이상이 아크고장으로 발생하고, 최근 5년간 발생한 전기화재는 80 % 정도가 아크고장으로 인한 화재라고 발표하였다[1-2].

이에 따라 2005년도부터는 가정용 침실과 에어컨 부하에 아크차단기(AFCI)를 설치하게 되었으며, 2008년도부터는 일반 주택에서 사용하는 대부분의 전기설비에 아크차단기를 설치하도록 의무화하였다[3]. 따라서 아크차단기 제조 및 시험 기준인 UL 1699 규격이 많은 관심 대상이 되고 있으며, 그 중에서 아크고장 신호 검출과 관련된 아크고장 검출시험, 원치않는 아크차단시험, 아크고장 저해시험을 중요하게 다루고 있다[4]. 일반적으로 많은 시험방법이 정량화 및 정규화되어 있지만, 부하의 특성에 따라 아크고장 신호가 변질되는 아크고장 신호 저해시험 부분이 정량화 및 정규화되지 않았다. 따라서 이러한 정규화되지 않은 아크고장 신호를 분석하기 위하여 1970년대 이후부터 신호처리 측면에서 많은 관심을 갖게 되었다. 1980년대까지는 시간영역(time domain)에서 아크고장 신호분석이 이루어졌고[5-6], 1990년대에는 주파수영역(frequency domain)에서 신호분석이 이루어졌으며[7-9], 2000년대에는 이산 웨이블렛 변환(Discrete wavelet transform)을 이용한 신호분석 방법이 많이 사용되고 있다.[10-17]. 이산 웨이블렛 변환을 이용하여 아크고장 신호를 분석하는 방법은 상세계수(detail coefficient)를 분석하는 방법과 근사계수(approximation)를 분석하는 방법으로 나눌 수 있다. 상세계수를 분석하는 방법은 신호의 세밀한 부분을 정확히 분석할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 근사계수를 분석하는 방법은 다양한 신호를 정규화하는데 유리하다는 장점이 있다[10-17].

본 논문에서는 아크고장전류 신호 분석방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 ① 근사계수 분석방법에 의한 최대치 변화율 · 실효치 변화율 분석방법[16-17], ② 상세계수 분석방법에 의한 최대치 변화율 · 실효치 변화율 분석방법[10-15], ③ 근사계수 분석방법에 의한 잡음량 변화율 · shoulder 유지시간 변화율 분석방법[16-17] 등 3가지 분석방법을 비교 분석하고, 직렬 아크고장 신호 검출을 위한 중요한 항목이 무엇인지 판단하고자 한다.

2. 이산 웨이블렛 변환

2.1 이산 웨이블렛 변환 이론

임의의 신호 $f[n]$은 기저함수 $\varphi[n]$의 선형조합으로 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$f[n] = \sum_{k} a_k \varphi_k[n] \tag{1}$$

† 교신저자, 정회원 : 전기안전연구원 선임연구원 · 공박
E-mail : bimil5018@naver.com
* 정 회 원 : 전기안전연구원 연구원
** 정 회 원 : 강원대학교 전기·전자공학과 교수 · 공박
*** 정 회 원 : 인천대학교 전기공학과 교수 · 공박
접수일자 : 2009년 7월 21일
최종완료 : 2009년 8월 20일

여기서, a_k 는 스케일 계수이고 $\varphi_k[n]$은 스케일 함수이다. 웨이블렛 변환을 위해서는 웨이블렛 함수를 구현하여야 하는데, 웨이블렛 함수 $\psi[n]$는 스케일 함수를 통하여 구현할 수 있다. 스케일 함수와 웨이블렛 함수는 정규직교(orthonor-mal)의 관계를 갖는다.

신호 $f[n]$은 스케일 함수 $\varphi_k[n]$로 해상도가 다른 수학적 영역 V_j로 분해(사영)하여 표현하는 다해상도 해석(MRA : multi-resolution analysis) 방법으로 구현할 수 있다. 다해상도 해석 방법을 이용하면, 해상도가 다른 영역에서 아크고장 신호의 특이점을 정확히 분석할 수 있다.

식 (1)에서 스케일 함수 $\varphi[n]$는 식 (2)와 같이 $\varphi[2n]$의 가중합으로 표현할 수 있다.

$$\varphi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \sum_k h[k]\, \varphi[2^j n - k] \tag{2}$$

여기서, $h[k]$은 상위 영역에서 하위 영역으로 확장을 가능하게 하는 스케일 계수라 불리는 실수 또는 복소수이고, $2^{j/2}$는 스케일 함수 $\varphi[2n]$의 놈(norm)을 유지하기 위한 상수이다. 스케일 함수는 식 (2)를 통하여 영역을 확장할 수 있다.

웨이블렛 함수 $\psi[n]$은 스케일 함수를 이용하여 구현한다. 스케일 함수와 직교하는 기저함수를 이용하여 웨이블렛 공간을 생성하고, 함수 집합을 정의함으로써 웨이블렛 함수를 구한다. 이때 웨이블렛 함수 집합은 스케일 함수에 의해 생성된 공간에 포함되기 때문에 식 (3)과 같이 식 (2)에서 정의된 스케일 함수 $\varphi[2n]$으로 표현할 수 있다.

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \sum_k g[k]\, \varphi[2^j n - k] \tag{3}$$

스케일 함수 식 (2)와 웨이블렛 함수 식 (3)을 이용하여 신호 $f[n]$은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$f[n] = \sum_k \sum_j^{\infty} c_{j,k}\, \varphi_{j,k}[n] + \sum_k \sum_j^{\infty} d_{j,k}\, \psi_{j,k}[n] \tag{4}$$

여기서, $c_{j,k}$를 이산 웨이블렛 변환(DWT)의 근사계수(approximated coefficients)라 하고 $d_{j,k}$를 상세계수(detailed coefficients)라고 한다.

그러나 스케일 함수 $\varphi_{j,k}[n]$와 웨이블렛 $\psi_{j,k}[n]$를 사용하여 이산 웨이블렛 변환을 실현하기에는 어렵기 때문에 스케일 함수에 의한 스케일 필터 계수와 웨이블렛에 의한 웨이블렛 필터 계수를 사용한다.

식 (4)의 근사계수와 상세계수는 영역 확장에 따른 계수 사이의 관계를 정립하면, 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$c_{j,k} = \sum_m h(m-2k)\, c_{j+1}(m) \tag{5}$$

$$d_{j,k} = \sum_m g(m-2k)\, c_{j+1}(m) \tag{6}$$

근사계수 $c_{j,k}$과 상세계수 $d_{j,k}$는 웨이블렛을 이용한 신호 $f[n]$의 효율적인 분해 알고리즘이며, 스케일 필터 계수 및 웨이블렛 필터 계수와 신호 $f[n]$의 콘벌루션을 통해 출력신호를 얻는다.

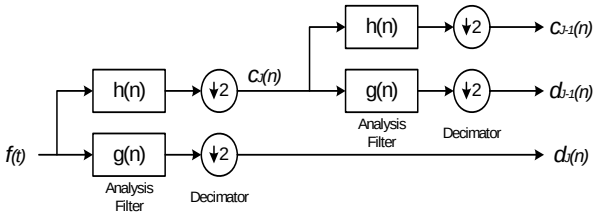


그림 1 DWT를 이용한 2-단계 분해 트리
Fig. 1 Binary decomposition tree for two-scale DWT

그림 1은 근사계수와 상세계수를 이용한 이산 웨이블렛 변환의 2-단계 분해를 나타낸다. 분해 레벨의 증가는 적합한 신호 분석을 위해 다수의 단계로 실현할 수 있다. $c_j(n)$은 스케일 함수를 기저로 하는 저역통과 필터(LPF)이고, $d_j(n)$은 웨이블렛 함수를 기저로 하는 고역통과 필터(HIF 또는 BPF)이다.

2.2 모 웨이블렛 및 분해레벨 결정

이산 웨이블렛 변환을 실현하기 위해서는 모 웨이블렛(mother wavelet)과 분해 레벨(Level)의 선정이 반드시 필요하다. 모 웨이블렛을 선정한다는 것은 신호 분석을 위한 최적의 필터를 선정하는 것과 같다. 따라서 직렬 아크고장 신호를 분석하기 위해서는 직렬 아크고장 신호와 유사한 모 웨이블렛을 선정하여야 한다.

모 웨이블렛의 종류는 Harr, Morlet, Daubechies, Symlets 등 매우 다양하지만, 일반적으로 아크고장 신호분석에 사용되는 모 웨이블렛은 Daubechies 4(db4), symlets 4(sym4), coiflets 4(coif4), Daubechies 14(db14) 등이 있다[10-17].

모 웨이블렛은 종류에 따라 함수의 길이, 즉 차수가 다르다. 차수가 낮은 모 웨이블렛은 길이가 짧고 작은 변화를 가지고 있기 때문에 아크, 써어지, 과도현상 등을 분석하는데 유리하며, 차수가 높은 모 웨이블렛은 길이가 길기 때문에 순간전압강하(sag), 순간전압상승(swell), 순간정전 등을 분석하는데 유리하다.

본 논문에서는 아크고장 신호 분석에 적합한 모 웨이블렛을 선정하기 위하여 아크고장 신호 분석에 많이 사용되는 daubechies 4(db4), symlets 4(sym4), coiflets 4(coif4), daubechies 14(db14)를 검토하였다. 검토 방법은 원 신호의 기본 파형이 왜곡되지 않고 아크의 특징인 써지성 파형과 잡음이 동일 레벨에서 많이 제거되는 제거량을 기준으로 하였다. 표 1은 이산 웨이블렛 변환을 레벨 4까지 실현할 경우, 각각의 근사계수에서 제거되는 잡음 제거량의 합계를 나타낸다.

표 1에서 합계가 가장 크고 8종의 부하기기 중, 4개의 부하기기에서 가장 큰 값을 갖는 모 웨이블렛은 db4이다. 따라서 본 논문에서는 아크로 인한 써지성 파형과 잡음 제거에 우수한 db4를 모 웨이블렛으로 결정하였다.

분해 레벨은 분석하고자 하는 아크고장 전류의 근본 파형이 왜곡되지 않고, 아크로 인해 발생한 노이즈 및 펄스 신호가 근사적인 아크고장 전류보다 작아져야 하며, 아크고장 검출을 위하여 제시된 항목의 평균값이 가장 크게 나타나는 레벨 4를 분해 레벨로 결정하였다.

표 1 모 웨이블렛에 따른 잡음 제거량
Table 1 Noise filtering-quantity of mother wavelets

구 분	db4	sym4	coif4	db14
컴 퓨 터(L1)	482.1	481.9	474.8	478.5
텔레비전(L2)	379.4	371.8	373.5	371.4
CFL램프(L3)	645.1	647.7	624.6	643.4
형광램프(L4)	318.1	318.4	318.6	318.5
냉 장 고(L5)	711.4	710.3	708.7	709.7
백열램프(L6)	195.9	196.1	196.0	196.0
전기히터(L7)	736.5	736.1	735.2	735.2
드라이어(L8)	793.6	794.4	793.6	793.5
합 계	4,262.1	4,256.7	4,225.0	4,246.2

3. 직렬 아크고장 전류 분석

3.1 직렬 아크고장전류 측정 및 특징 분석

본 논문은 다양한 부하기기의 전원선에서 발생하는 다양한 특징을 갖는 직렬 아크고장 전류를 이산 웨이블렛 변환을 이용한 3가지 방법으로 분석하고 검출 확률을 얻기 위한 것으로써, 일반 가정에서 많이 사용하고 있는 다수의 부하기기를 대상으로 하였다. 아크고장 전류를 측정하기 위한 회로는 UL 1699 규격[4]에 따라 그림 2와 같이 구성하고 그림 3과 같은 직렬 아크 발생장치를 개발하여 사용하였다.

직렬 아크발생장치는 고정전극과 이동전극으로 구성되며, 고정전극은 구리봉을 사용하였고 이동전극은 탄소-흑연봉을 사용하였다. 측정은 오실로스코프(1MS/s sample rate)를 이용하였고 전류 측정은 50㎒ 밴드를 갖는 CT를 사용하였다.

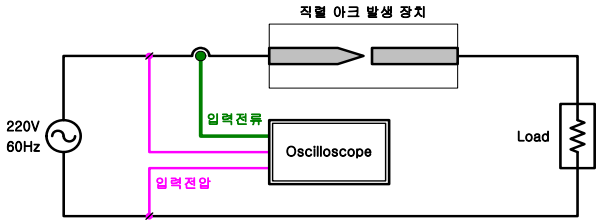


그림 2 직렬 아크고장전류 측정 회로
Fig. 2 Series arc fault current detection system

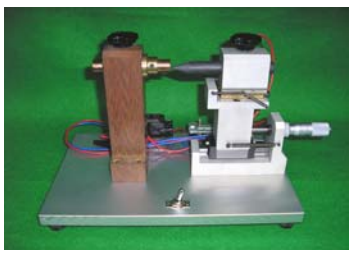


그림 3 직렬 아크 발생 장치
Fig. 3 Arc generator tester

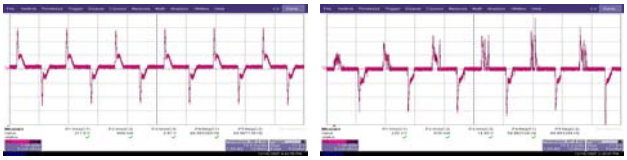
부하기기는 비선형부하 5종과 선형부하 3종이며, 부하전류의 형태에 따라 분류하면 부하기기 내부에 능동역률개선회로(PFC : Power Factor Correction)가 포함되어 있지 않은 부하 - 개인용 컴퓨터, 텔레비전, CFL 램프 - 3종과 PFC가 포함되어 있는 부하 - 냉장고, 형광램프 - 2종, 저항성 부하 - 백열램프, 전기히터(Electric heater), 헤어드라이어 - 3종이다. 그림 4~11은 선택한 부하기기의 전원선에서 측정한 대표적인 정상전류와 아크고장 전류이다.

a) 정상전류(1A/div.) b) 아크고장전류(1A/div.)

그림 4 개인용 컴퓨터의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 4 Normal and arc fault current from a desktop

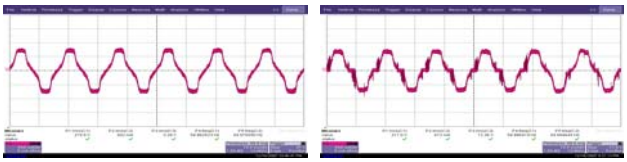
a) 정상전류(1A/div.) b) 아크고장전류(1A/div.)

그림 5 텔레비전의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 5 Normal and arc fault current from a TV



a) 정상 전류(1A/div.) b) 아크고장전류(1A/div.)

그림 6 CFL 램프의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 6 Normal and arc fault current from a CFL.



a) 정상전류(0.5A/div.) b) 아크고장전류(0.5A/div.)

그림 7 형광 램프의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 7 Normal and arc fault current from a FL.

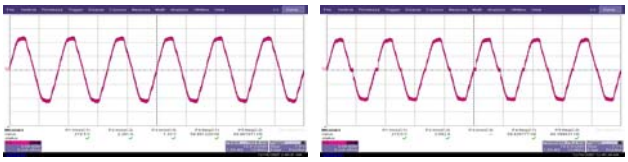
a) 정상 전류(1A/div.) b) 아크고장전류(1A/div.)

그림 8 냉장고의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 8 Normal and arc fault current from a refrigerator

a) 정상 전류(0.5A/div.) b) 아크고장전류(0.5A/div.)

그림 9 백열램프의 정상전류와 아크고장 전류

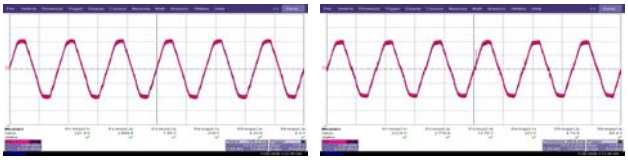
Fig. 9 Normal and arc fault current from a incandescent



a) 정상 전류(2A/div.) b) 아크고장전류(2A/div.)

그림 10 전기히터의 정상전류와 아크고장 전류

Fig. 10 Normal and arc fault current from a electric-heater



a) 정상 전류(2A/div.) b) 아크고장전류(2A/div.)

그림 11 헤어드라이어의 정상전류와 아크고장 전류

Fig. 11 Normal and arc fault current from a hair-dryer

PFC가 포함되어 있지 않은 부하기기의 직렬 아크고장 전류 특징은 최대치 및 실효치의 변화가 크고, 써지성 파형 및 잡음이 불규칙적으로 발생하는 특징을 갖는다. PFC가 포함된 부하기기는 저항성 부하에서 나타나는 shoulder가 발생하며, 동시에 잡음이 포함되는 특징을 갖는다. 저항성 부하기기의 직렬 아크고장 전류 특징은 최대치 및 실효치의 변화와 잡음이 없으며 shoulder가 나타나는 특징을 갖는다.

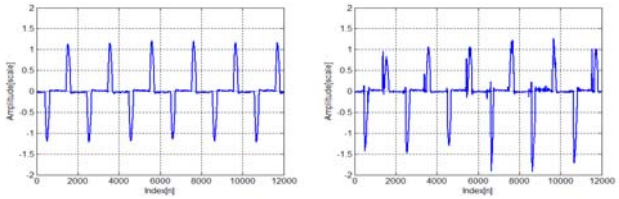
3.2 직렬 아크고장전류 분석

본 논문에서는 기존에 발표된 상세계수의 최대치, 실효치를 분석하는 방법[10-15]과 근사계수의 최대치, 실효치를 분석하는 방법[16-17], 잡음량, shoulder 유지시간을 분석하는 방법[16-17]을 정량적으로 비교하였다. 정량적 비교를 위해서 다음과 같이 동일한 조건을 설정하고 아크고장 검출 확률을 비교하였다.

① 분석을 위한 정상전류 및 아크고장 전류의 샘플링 주파수는 동일하게 120㎑를 사용한다.

② 모 웨이블렛은 Daubechies 4를 사용하고, 분해 레벨은 레벨 4로 한다.

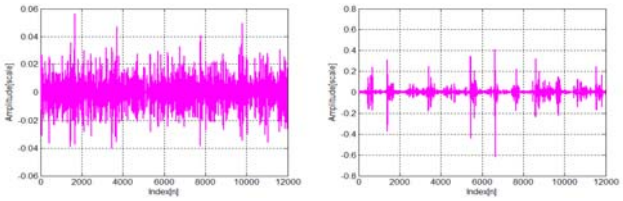
그림 12는 그림 5에서 제시한 텔레비전 부하 전류를 Daubechies 4 모 웨이블렛을 사용하여 레벨 4까지 분해한 정상전류와 아크고장전류의 근사계수이고, 그림 13은 상세계수이다. 그림 14는 텔레비전의 정상전류와 아크고장전류를 동일한 조건으로 30회 측정하고 근사계수 분석방법에 의한 최대치 변화율을 수치로 나타낸 것이다.



(a) 정상전류 (b) 아크고장 전류

그림 12 텔레비전의 정상전류 및 아크고장 전류 근사계수

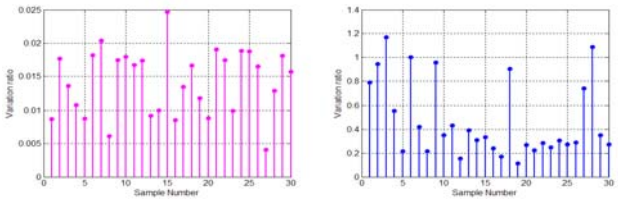
Fig. 12 Approximation coefficients of normal current and arc fault current form a TV



(a) 정상전류 (b) 아크고장 전류

그림 13 텔레비전의 정상전류, 아크고장전류 상세계수

Fig. 13 Detail coefficients of normal current and arc fault current form a TV



(a) 정상전류 (c) 아크고장전류

그림 14 근사계수분석에 의한 최대치 변화율

Fig. 14 Variation ratio of peak by using approximation coefficient

그림 13은 텔레비전의 정상전류와 아크고장전류를 30회 측정하고 근사계수 분석방법에 의한 최대치 변화율을 나타낸 것이다.

정상전류의 최대치 변화율은 0.03이하이며, 아크고장전류의 최대치 변화율은 0.12 이상이다. 이와 같은 분석방법으로 측정된 8개 부하의 최대치 변화율, 실효치 변화율, 잡음량 변화율, shoulder 유지시간 변화율을 계산하고, 그 결과를 그림 15~18에 나타내었다. 모든 부하에서 정상전류의 최대치 변화율, 실효치 변화율, 잡음량 변화율, shoulder 유지시간 변화율이 0.03 이하로써 그림에서 제외하였으며, 아크고장전류의 변화율은 그림에서와 같이 측정된 부하의 종류에 따라 많은 차이가 나타남을 알 수 있다.

아크고장 전류를 검출하기 위하여 검출 기준치(threshold)를 0.1로 선정하였다. 검출 기준치를 낮게 선정할 경우에는 제시된 방법에 의한 검출 확률이 높아지지만, 정상전류에서 나타나는 작은 변화도 아크고장으로 판단할 수 있어 검출 오차가 증가된다. 적정한 기준치 선정을 위하여 분석한 결과, 검출 기준치를 0.1로 결정하는 것이 검출 오차가 적으며 가장 타당한 것으로 분석되었다.

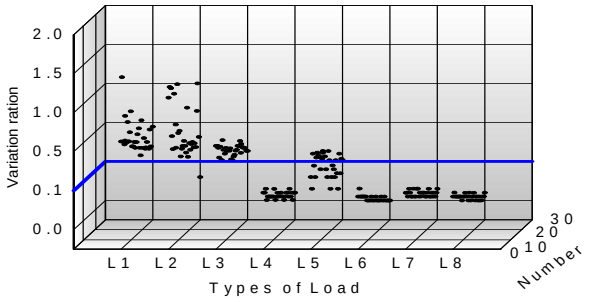


그림 15 최대치 변화율
Fig. 15 Variation ratio of the peak value

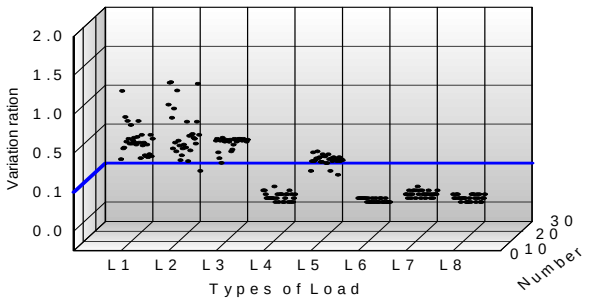


그림 16 실효치 변화율
Fig. 16 Variation ratio of the RMS value

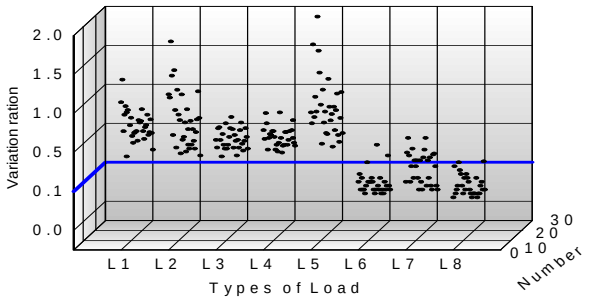


그림 17 잡음량 변화율
Fig. 17 Variation ratio of the noise

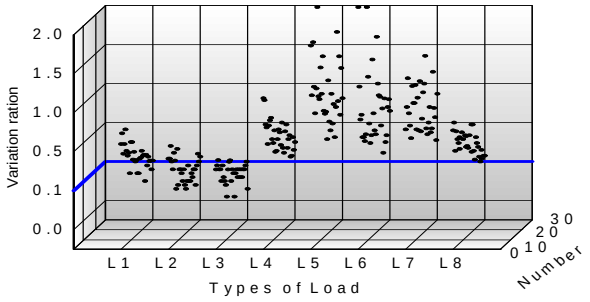
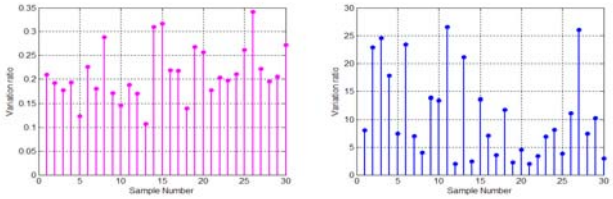


그림 18 Shoulder 변화율
Fig. 18 Variation ratio of the shoulder

그림 19는 상세계수 분석방법에 의한 정상전류의 최대치 변화율과 아크고장전류의 최대치 변화율을 수치로 나타낸 것이다. 정상전류의 최대치 변화율 범위는 0.1~0.35이며, 아크고장전류의 최대치 변화율 범위는 2~27이다. 이와 동일한 방법을 사용하여 측정된 8개 부하의 최대치 변화율을 계산하고 변화율의 분포도를 작성하면 그림 20과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 정상전류 (c) 아크고장전류

그림 19 상세계수분석에 의한 최대치 변화율
Fig. 19 Variation ratio of peak by using detail coefficient

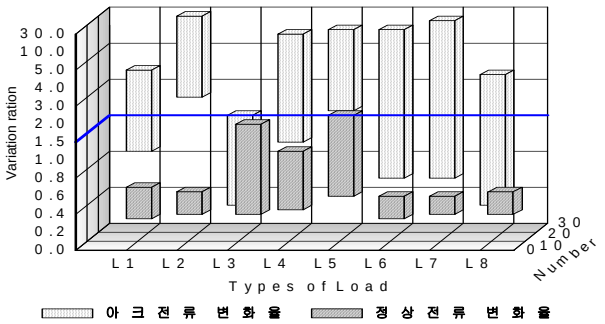


그림 20 정상전류 및 아크고장 전류의 최대치 변화율 분포
Fig. 20 The distribution of peak variation ratio of normal and arc fault current

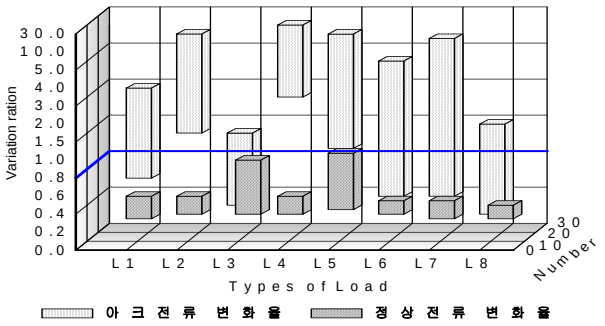


그림 21 정상전류 및 아크고장 전류의 실효치 변화율 분포
Fig. 21 The distribution of RMS variation ratio of normal and arc fault current

그림 20에서 냉장고의 정상전류 최대치 변화율 범위가 0.3~1.5로 가장 크게 나타나고 있기 때문에 아크고장전류의 검출 기준치는 1.5로 결정하는 것이 타당하다. 실효치 변화율에서도 그림 21과 같이 냉장고의 정상전류 변화율 범위가 0.1~0.8로 나타나고 있기 때문에 검출 기준치는 0.8로 결정하는 것이 타당하다.

따라서 상세계수 분석방법에 의한 최대치 변화율 기준치는 1.5, 실효치 변화율 기준치는 0.8, 근사계수 분석방법에 의한 최대치, 실효치, 잡음량, shoulder 유지시간 변화율 기준치를 0.1로 결정하고 아크고장 전류 검출량을 계산하였다.

표 2는 근사계수 분석방법에 의한 최대치/실효치 변화율 분석방법, 상세계수 분석방법에 의한 최대치/실효치 변화율 분석방법, 근사계수 분석방법에 의한 잡음량/shoulder 유지시간 변화율 분석방법으로 직렬 아크고장 전류를 검출할 수 있는 검출량을 표로 나타낸 것이다.

표 2 분석 방법에 따른 직렬 아크고장 검출 횟수[회]
Table 2 Detection number of series arc fault current

항 목	근사계수		상세계수		근사계수	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Noise	Shoulder
컴 퓨 터(L1)	30	30	26	12	30	24
텔레비전(L2)	29	29	30	30	30	9
CFL램프(L3)	30	30	0	0	30	0
형광램프(L4)	0	0	27	30	30	30
냉 장 고(L5)	15	27	30	24	30	30
백열램프(L6)	0	0	9	3	3	30
전기히터(L7)	0	0	18	16	14	30
드라이어(L8)	0	0	3	0	1	30
총 계	104	116	143	115	168	183

분석 결과, 근사계수 분석방법에 의한 최대치, 실효치 변화율은 능동 역률개선회로를 포함하고 있지 않은 개인용 컴퓨터, 텔레비전, CFL 램프의 전원선에서 발생하는 아크고장 신호를 쉽게 검출할 수 있으며, 다른 부하에서 발생하는 아크고장 신호는 검출하기가 어렵다. 상세계수 분석방법에 의한 최대치, 실효치 변화율은 텔레비전, 형광램프, 냉장고 부하에서 발생하는 아크고장을 대부분 검출할 수 있으며 다른 부하에서 발생하는 아크고장은 검출 확률이 낮다. 근사계수 분석방법에 의한 잡음량 변화율 분석방법으로는 5개 부하에서 발생하는 아크고장을 100 % 검출할 수 있으며, shoulder 유지시간 변화율 분석방법으로도 5개 부하에서 발생하는 아크고장을 100 % 검출할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 잡음량 변화율과 shoulder 유지시간 변화율 분석방법을 결합하여 사용한다면, 모든 부하의 전원선에서 발생하는 직렬 아크고장 전류를 검출할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 UL 1699의 아크 저해시험에서 제시되고 있는 직렬 아크고장시험을 가정용 부하기기 8종에 대하여 실시하고 아크고장 신호의 특징을 분석하였다. 또한 아크고장전류 분석방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 이산 웨이블렛 변환을 이용한 3가지 분석방법에 대하여 아크고장전류 검출량을 비교 분석하였다. 분석결과, ① 근사계수 분석방법에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 총 480회 중에서 230회를 검출할 수 있었고, ② 상세계수 분석방법에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 258회를 검출할 수 있었으며, ③ 근사계수 분석방법에 의한 잡음량 변화율·shoulder 유지시간 변화율 분석방법은 351회를 검출할 수 있었다. 잡음량 변화율 분석방법으로는 5개 부하에서 발생하는 아크고장을 100 % 검출할 수 있으며, shoulder 유지시간 변화율 분석방법으로도 5개 부하에서 발생하는 아크고장을 100 % 검출할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 잡음량 변화율과 shoulder 유지시간 변화율을 결합하여 사용한다면, 모든 부하의 전원선에서 발생하는 직렬 아크고장 전류를 검출할 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로 직렬 아크고장 신호 분석에서는 아크로 인하여 발생하는 잡음량 및 shoulder 유지시간 변화율이 매우 중요한 항목임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 반기종, 김낙교, "전기화재 방지를 위한 아크고장전류 차단기 설계", 대한전기학회 논문지, Vol. 55D, No. 5, pp. 220~225, May, 2006.

[2] 박치현, 배석명, 임용배, 김기현, 최명일, "아크 회로의 특성 분석 및 AFCI 설치로 인한 사회적 비용평가에 관한 연구", 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 21, No. 8, pp. 144~150, Sept., 2007.

[3] An International Codes and Standards Organization, "National Electrical Code HAND BOOK", 2008.

[4] Underwrites Laboratories Inc., "UL 1699 Standard for Arc-Fault Circuit-interrupters", August, 2008.

[5] Robert E. Lee, M. T. Bishop, "Performance Testing of the Ration Ground Relay On a Four-Wire Distribution Feeder", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, Sept., 1983.

[6] C. J. Kim, B. Don Russell, "Classification of Faults and Switching Events by Inductive Reasoning and Expert System Methodology", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July, 1989.

[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] K. Y. Lien, S. L. Chen, C. J. Liao, T. Y. Guo, T. M. Lin, J. S. Shen, "Energy Variance Criterion and Threshold Tuning Scheme for High Impedance Fault Detection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July, 1999.

[9] A.E.Emanuel, D.Cyganski, J.A.Orr, E.M.Gulachenski, "High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 154kV Distribution Feeders : Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April, 1990.

[10] Hongkun Zhang, Tao Chen, Wen-Jun Li, "Arc Fault Signatures Detection on Aircraft Wiring System", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 5548~5552, June, 2006.

[11] Nagy I. Elkalashy, Matti Lehtonen, Hatem A. Darwish, Mohamed A. lzzularab, Abdel Maksould 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.

[12] 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.
[13] T.M.Lai, L.A.Snider, E.Lo, D.Sutanto, "High - Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Frequency Range and RMS Conversion", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 397~407, January, 2005.
[14] 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.
[15] Chul-Hwan Kim, Hyun Kim, Young-Hun Ko, Sung-Hyun Byun, "A Novel Fault-Detection Technique of High- Impedance Arcing Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp. 921~929, Oct., 2002.
[16] 방선배, 박종연, "웨이블렛 변환을 이용한 직렬 아크 고장 신호 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 3, pp. 494~500, Mar., 2008.
[17] 방선배, 박종연, 장목순, 최원호, "웨이블렛 변환을 이용한 비선형 부하 전원선에서의 직렬 아크고장 신호 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 8, pp. 1470~1476, Aug., 2008.

저 자 소 개

방 선 배 (方 善 培)

1968년 5월 18일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 강원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 전기안전연구원 선임연구원.
Tel : 031-580-3074
E-mail : bimil5018@naver.com

김 종 민 (金 鐘 旻)

1972년 7월 18일생. 1998년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 전기안전연구원 주임연구원.
Tel : 031-580-3077
E-mail : cmkim@kesco.or.kr

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 전기전자공학부 교수.

정 영 식 (鄭 英 植)

1958년 2월 14일생. 1983년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1990년 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(공박). 2000~2001년 Virginia Tech 교환교수. 현재 인천대학교 전기공학과 교수