

이산 웨이블릿 변환을 이용한 직렬 아크고장전류 분석

방선배, 김종민, 박종연*
 전기안전연구원, 강원대학교*

Analysis of Series Arc Fault Current Using Discrete Wavelet Transform

Sun-Bae Bang, Chong-Min Kim, Chong-Yeun Park*
 Electrical Safety Research Institute KESCO, Kangwon National Univ.*

Abstract - 누전차단기 설치 상태에서도 전기화재가 지속적으로 발생함에 따라 전기화재의 원인이 되는 전기 아크에 대한 관심이 증가하고 있는 실정으로, 본 논문에서는 UL1699의 아크 저해시험(inhibition tests)에서 제시하고 있는 직렬 아크고장시험(Arc generator test)을 실시하고, 아크고장전류 분석방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 이산 웨이블릿 변환을 이용한 3가지 분석방법에 대하여 아크고장전류 검출 확률을 분석하였다. 분석결과, ① 근사계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 46%의 검출 확률을 얻을 수 있었고, ② 상세계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 62%, ③ 근사계수 분석에 의한 잠음량 변화율·shoulder 변화율 분석방법은 100% 검출 확률을 얻을 수 있었다.

1. 서 론

누전차단기가 100% 보급된 상황에서도 전기로 인한 화재가 지속적으로 발생하고 있어, 이와 관련한 전기 아크에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다.

미국·캐나다에서는 전기화재 중 아크로 인한 화재가 82% 이상 차지한다는 분석결과가 발표되었고, 이에 따라 2005년도부터는 가정용 침실과 에어컨 부하에 아크차단기(AFCI)를 설치하게 되었으며, 2008년도부터는 주택 대부분의 부하에 아크차단기 설치를 의무화하고 있다. 따라서 아크차단기 제조 및 시험 기준인 UL 1699 규격이 많은 관심 대상이 되고 있으며, 그 중에서 아크고장 검출과 관련된 아크검출시험(Arc detection test), 원치않는 아크시험(Unwanted tripping test), 아크신호 저해시험(Inhibition test)이 매우 중요하게 다루어지고 있다.

일반적으로 많은 시험방법이 정량화 및 정규화되어 있지만, 부하의 특성에 따라 아크신호가 변질되는 아크신호 저해시험 부분이 정량화 및 정규화되지 않은 실정이다.

따라서 이러한 신호를 분석하기 위하여 1970년 이후부터 많은 관심을 갖게 되었으며, 1980년대까지는 시간영역(time domain)에서 분석이 이루어졌고, 1990년대에는 주파수영역(frequency domain)에서 분석이 이루어졌으며, 2000년대에는 이산 웨이블릿 변환(Discrete wavelet transform)을 이용한 신호분석 방법(time-frequency domain)이 많이 사용되고 있다.

이산 웨이블릿 변환 분석방법은 상세계수를 분석하는 방법과 근사계수를 분석하는 방법으로 나눌 수 있는데, 상세계수 분석방법은 신호의 세밀한 부분을 정확히 분석할 수 있는 장점을 갖고 있으며, 근사계수 분석방법은 다양한 신호를 정규화하는데 유리하다는 장점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 직렬 아크고장전류 분석방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 ① 상세계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법[1~6], ② 근사계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법[7,8], ③ 근사계수 분석에 의한 잠음량 변화율·shoulder 변화율 분석방법[7,8] 등 3가지 분석방법에

대하여 아크고장전류 검출 확률을 제시하고자 한다.

2. 직렬 아크고장전류 분석
 2.1 이산 웨이블릿 변환

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

$$f[n] = \sum_k a_k \varphi_k[n] \quad (1)$$

여기서, a_k 는 스케일 계수이다. 신호 $f[n]$ 은 정규직교 기저(orthonormal basis)인 웨이블릿 함수 $\psi[n]$ 와 스케일 함수 $\varphi[n]$ 으로 표현하는 다해상도 해석(MRA : multi-resolution analysis) 방법으로 구현할 수 있다. 다해상도 해석이란 스케일 함수 $\varphi_k[n]$ 를 이용하여 신호 $f[n]$ 을 해상도가 다른 수학적 영역 V_j 에 사영(내적)하는 것을 의미한다. $\varphi[n]$ 는 식 (2)와 같이 $\varphi[2n]$ 의 가중합으로 표현할 수 있다.

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

여기서, $h[k]$ 은 상위 영역에서 하위 영역으로 확장을 가능하게 하는 스케일 계수와 불리는 실수 또는 복소수이고, $\sqrt{2}$ 는 스케일 함수 $\varphi[2n]$ 의 놈(norm)을 유지하기 위한 상수이다. 웨이블릿 함수 $\psi[n]$ 은 스케일 함수를 이용하여 구한다. 스케일 함수와 직교하는 기저함수를 이용하여 웨이블릿 공간을 생성하고, 함수 집합을 정의함으로써 웨이블릿 $\psi[n]$ 를 구한다. 웨이블릿 함수 집합은 스케일 함수에 의해 생성된 공간에 포함되기 때문에 식 (3)과 같이 식 (2)에서 정의된 스케일 함수 $\varphi[2n]$ 로 표현할 수 있다.

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

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

$$f[n] = \sum_k \sum_j c_{j,k} \varphi_{j,k}[n] + \sum_k \sum_j d_{j,k} \psi_{j,k}[n] \quad (4)$$

여기서, $c_{j,k}$ 와 $d_{j,k}$ 를 DWT의 근사계수(approximated coefficients)와 상세계수(detailed coefficients)라고 한다. 스케일 함수 $\varphi_{j,k}[n]$ 와 웨이블릿 $\psi_{j,k}[n]$ 를 사용하여 이산 웨이블릿 변환을 실현하기에는 어렵기 때문에 스케일 함수에 의한 스케일 계수와 웨이블릿에 의한 웨이블릿 계수를 사용하기 위하여 계수 사이의 관계를 정립하면, 식 (5), 식 (6)과 같다.

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

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

근사계수 $c_{j,k}$ 과 상세계수 $d_{j,k}$ 는 웨이블릿을 이용한 신호 $f[n]$ 의 효율적인 분해 알고리즘이며, 스케일 필터 계수 및 웨이블릿 필터 계수와 신호 $f[n]$ 의 콘볼루션을 통해 출력신호를 얻는다. 그림 1은 근사계수와 상세계수를 이용한 이산 웨이블릿 변환의 2-단계 분해를 나타낸다. 분해 레벨의 증가는 적합한 신호 분석을 위해 다수의 단계로 실현할 수 있다.

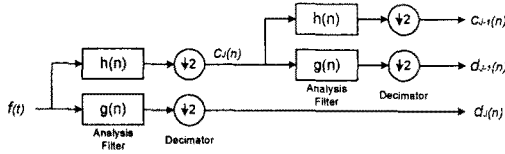


그림 1 DWT를 이용한 2-단계 분해 트리
Fig. 1 Binary decomposition tree for two-scale DWT

2.2 모 웨이블릿 및 분해레벨 결정

이산 웨이블릿 변환을 실현하기 위해서는 모(mother) 웨이블릿과 분해 레벨을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 근사계수 분석을 위하여 원 신호의 기본 파형이 왜곡되지 않고 아크의 특징인 찌지성 파형과 잡음이 동일 레벨에서 많이 제거되는 제거량을 기준으로 모 웨이블릿을 선정한다. 결과 daubechies 4가 결정되었다. 또한 분해 레벨은 분석하고자 하는 아크고장 전류의 근사적인 형태가 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.

2.3 직렬 아크고장전류 측정 및 특징 분석

본 논문은 다양한 부하기의 전원선에서 발생하는 다양한 특징을 갖는 직렬 아크고장 전류를 분석하기 위한 것으로서, 일반 가정에서 많이 사용하고 있는 다수의 부하기기를 대상으로 하였다. 부하기기는 비선형부하 5종과 선형부하 3종이며, 부하전류의 형태에 따라 분류하면 부하 기기 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 2~8은 각 부하 기기 전원선에서 측정된 정상전류와 아크고장 전류이다.

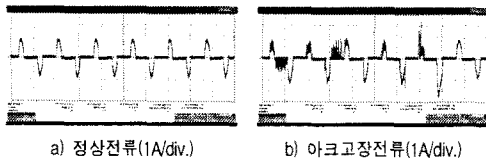


그림 2 개인용 컴퓨터의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 2 Normal and arc fault current from a desktop

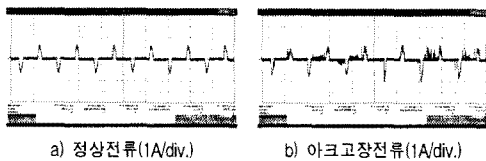


그림 3 텔레비전의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 3 Normal and arc fault current from a TV



그림 4 CFL 램프의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 4 Normal and arc fault current from a CFL

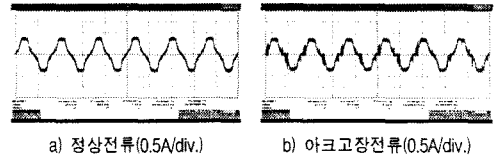


그림 5 형광 램프의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 5 Normal and arc fault current from a FL

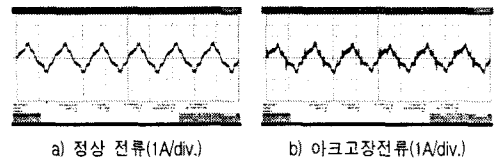


그림 6 냉장고의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 6 Normal and arc fault current from a refrigerator

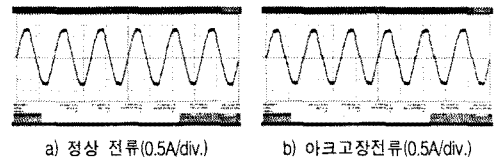


그림 7 백열램프의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 7 Normal and arc fault current from an incandescent

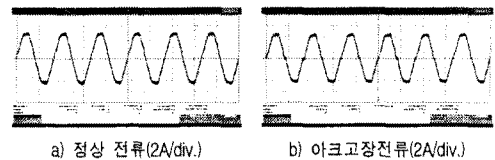


그림 8 전기히터의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 8 Normal and arc fault current from a electric-heater

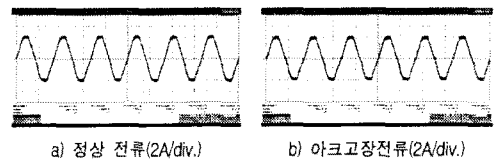


그림 9 헤어드라이어의 정상전류와 아크고장 전류
Fig. 9 Normal and arc fault current from a hair-dryer

PFC가 포함되어 있지 않은 부하 기기의 직렬 아크고장 전류 특징은 최대치 및 실효치의 변화가 크고, 찌지성 파형 및 잡음이 불규칙적으로 발생하는 특징을 갖는다. PFC가 포함된 부하 기기는 저항성 부하에서 나타나는 shoulder가 발생하며, 동시에 잡음이 포함되는 특징을 갖으며, 저항성 부하 기기의 직렬 아크고장 전류 특징은 최대치 및 실효치의 변화가 없고 shoulder가 나타나지만 잡음이 없는 특징을 갖는다.

2.4 직렬 아크고장 전류 분석 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 이산 웨이블릿 변환을 이용하여 다양한 부하기기의 전원선에서 발생하는 다양한 직렬 아크고장 신호를 실시간으로 검출하기 위한 것이다. 이러한 목적을 실현하기 위하여 최대치, 실효치, 잡음량, shoulder 유지시간의 주기적인 변화를 분석하는 그림 1과 같은 알고리즘을 사용하였다.

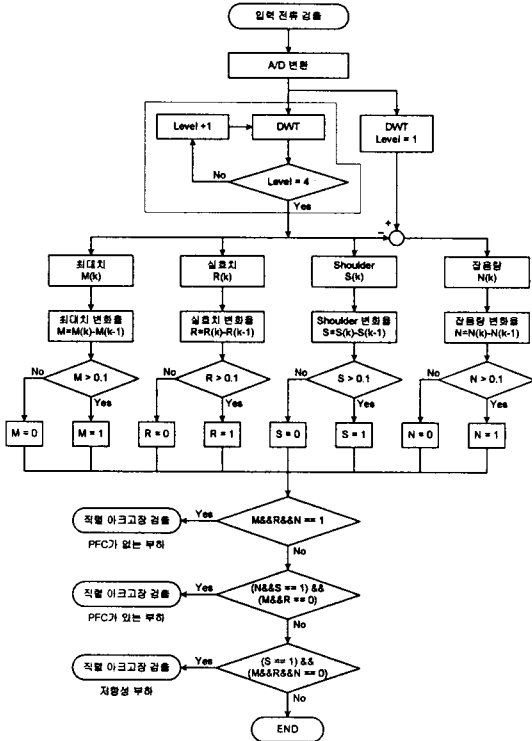


그림 10 아크고장 특성을 고려한 아크고장 검출 알고리즘
Fig. 10 Algorithm for arc fault detection according to different loads

2.5 분석방법에 따른 직렬 아크고장전류 분석

본 논문에서는 기존에 발표된 상세계수의 최대치, 실효치를 분석하는 방법[1~6]과 근사계수의 최대치, 실효치, 잡음량, shoulder 유지시간을 분석하는 방법[7~8]을 정량적으로 비교하고자 한다. 기존에 발표된 논문들에는 독창적이고 창의적인 분석방법이 포함되어 있기 때문에 정확하게 정량적으로 비교하기는 어렵지만, 다음과 같이 동일한 조건을 설정하고 아크고장 검출 확률 측면에서 비교하고자 한다.

- 분석을 위한 정상전류 및 아크고장 전류의 샘플링 주파수는 동일하게 120kHz이다.
- 모 웨이블릿은 아크고장 신호 분석에서 많이 사용되고 있는 Daubechies 4를 사용하고, 분해 레벨은 레벨 4로 한다.
- 분석 항목은 ① 근사계수 분석에 의한 최대치/실효치 변화율, ② 상세계수 분석에 의한 최대치/실효치 변화율, ③ 근사계수 분석에 의한 잡음량/shoulder 유지시간 변화율이다.

그림 11은 그림 3을 Daubechies 4 모 웨이블릿을 사용하여 레벨 4까지 분해한 정상전류와 아크고장전류의 근사계수이고, 그림 12는 상세계수이다.

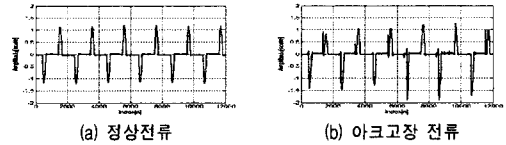


그림 11 텔레비전의 정상전류 및 아크고장 전류 근사계수
Fig. 11 Approximation coefficients of normal current and arc fault current

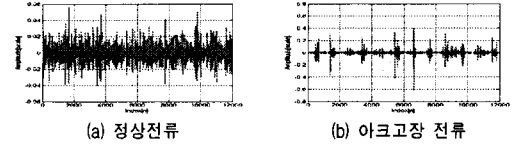


그림 12 텔레비전의 정상전류, 아크고장전류 상세계수
Fig. 12 Detail coefficients of normal current and arc fault current

그림 13은 그림 12를 30회 측정하고 근사계수 분석방법에 의한 정상전류의 최대치 변화율, 실효치 변화율과 아크고장전류의 최대치 변화율, 실효치 변화율이다.

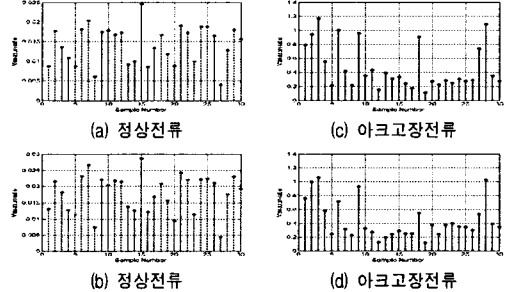


그림 13 근사계수분석에 의한 최대치(a,b), 실효치(c,d) 변화율
Fig. 13 Variation ratio of peak and RMS by using approximation coefficient

정상전류의 최대치 변화율과 실효치 변화율은 0.03 이하이며, 아크고장전류의 최대치 변화율과 실효치 변화율은 0.12 이상이다. 이와 같이 근사계수 분석방법에 의한 정상전류의 최대치 변화율과 실효치 변화율은 측정된 8개 부하 모두 0.03 이하이며, 아크고장전류의 최대치 변화율과 실효치 변화율은 측정된 부하의 종류에 따라 많은 차이가 나타난다.

그림 14는 상세계수 분석방법에 의한 정상전류의 최대치 변화율, 실효치 변화율과 아크고장전류의 최대치 변화율, 실효치 변화율이다.

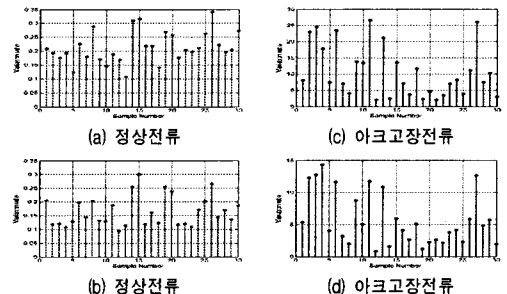


그림 14 상세계수분석에 의한 최대치(a,b), 실효치(c,d) 변화율
Fig. 14 Variation ratio of peak and RMS by using detail coefficient

그림 14에서 정상전류의 최대치 변화율 범위는 0.1~0.35, 실효치 변화율 범위는 0.1~0.3이며, 아크고장전류의 최대치 변화율 범위는 2~27이며, 실효치 변화율 범위는 1~15이다. 이와 동일한 방법을 사용하여 측정된 8개 부하의 최대치, 실효치 변화율을 계산하면, 냉장고의 정상전류 변화율 범위가 0.3~1.5로 가장 크게 나타나고 있기 때문에 아크고장전류의 검출 기준치는 1.5로 결정하고, 실효치 변화율에서도 냉장고의 정상전류 변화율 범위가 0.1~0.8로 나타나고 있어 검출 기준치는 0.8로 결정하여 아크고장 검출 확률을 계산한다.

표 1은 상세계수 분석 방법의 최대치 변화율 기준치(threshold)가 1.5, 실효치 변화율 기준치가 0.8일 경우와 근사계수 분석 방법의 최대치, 실효치, 잡음량, shoulder 유지시간 변화율 기준치가 0.1일 경우, 각 부하기기의 전원선에서 발생하는 직렬 아크고장을 검출할 수 있는 확률(%)을 나타낸 것이다.

표 1 분석 방법에 따른 직렬 아크고장 검출 확률(%)
Table 1 Detection probability of series arc fault current

항 목	근사계수 Peak/RMS	상세계수 Peak/RMS	근 사 계 수	
			Noise	Shoulder
컴 퓨 터	100	87	100	80
텔레비전	97	100	100	33
CFL램프	100	0	100	0
형광램프	0	93	100	100
냉 장 고	67	100	100	100
백열램프	0	38	10	100
전기히터	0	68	47	100
드라이어	0	10	3	100

분석 결과, 근사계수 분석방법의 최대치, 실효치 변화율은 능동 역률개선회로를 포함하고 있지 않은 개인용 컴퓨터, 텔레비전, CFL 램프의 전원선에서 발생하는 아크고장만을 검출할 수 있으며, 다른 부하에서 발생하는 아크고장은 검출할 수 없다. 상세계수 분석방법의 최대치, 실효치 변화율은 텔레비전, 냉장고 부하에서 발생하는 아크고장을 100% 검출할 수 있으며, 컴퓨터, 형광램프 부하의 아크고장은 87%, 93% 검출할 수 있다. 또한 잡음량과 shoulder의 유지시간 변화율 분석방법으로는 8개 부하에서 발생하는 아크고장을 100% 검출할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 UL1699의 아크 저해시험(inhibition tests)에서 제시하고 있는 직렬 아크고장시험(Arc generator test)을 실시하고, 이산 웨이블릿 변환을 이용하여 다양한 직렬 아크고장전류를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 아크고장전류 분석방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 이산 웨이블릿 변환을 이용한 3가지 분석방법에 대하여 아크고장전류 검출 확률을 분석하였다. 분석 결과, ① 근사계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 46%의 검출 확률을 얻을 수 있었고, ② 상세계수 분석에 의한 최대치 변화율·실효치 변화율 분석방법은 62%, ③ 근사계수 분석에 의한 잡음량 변화율·shoulder 변화율 분석방법은 100% 검출 확률을 얻을 수 있었다. 또한 직렬 아크신호 분석에서는 아크로 인해 발생하는 잡음량 및 shoulder의 유지시간을 분석하는 방법이 매우 중요함을 알 수 있었다.

- [1] 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.
- [2] Wen-Jun Li, Yuan-Chun Li, "Arc Fault Detection based on Wavelet Packet", Proceedings of FICML, pp. 18~21, Aug., 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 방선배, 박종연, "웨이블릿 변환을 이용한 직렬 아크고장 신호 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 3, pp. 494~500, Mar., 2008.
- [8] 방선배, 박종연, 장문순, 최원호, "웨이블릿 변환을 이용한 비선형 부하 전원선에서의 직렬 아크고장 신호 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 57, No. 8, pp. 1470~1476, Aug., 2008.