

혼합필터와 주파수분석기법을 이용한 교류 아크 검출 기법

AC Arc Detection Method using Mixed Filter and Frequency Analysis

장 동 욱* · 박 성 희[†] · 이 강 원**

(Dong-Uk Jang · Seong-Hee Park · Kang-Won Lee)

Abstract - In this paper, we propose a technique to determine the normal and arc of an alternating current using a mixed filter composed of an average filter and a band-pass filter and a frequency analysis. The proposed method uses the moving average filter of the FIR filter structure for noise removal and the band-pass filter of the IIR filter structure for detecting only specific frequency components after normalizing the measured current signal based on the maximum value. After performing Fast Fourier Transform (FFT) using the band-pass filtered signal, the total energy is calculated using the magnitude component of the frequency, and the arc is detected using the magnitude of the calculated energy. In order to show the validity of the proposed method, we experimented with various data and found that arc and steady state can be easily discriminated by calculating spectral energy. Therefore, it is considered that the proposed method can be applied to arc diagnosis of low voltage electric wire.

Key Words : Arc detection, Frequency analysis, Mixed filter, Series arc, Low voltage wire

1. 서 론

국내의 도시철도는 지하에 건설되는 경우가 대부분이며, 대부분의 철도역사에는 상점들이 밀집되어져 있다. 최근 발생하는 전기화재의 경우 2016년 통계를 보면 국내 전기화재 8,962건 가운데 40.6[%]인 3,643건이 누전, 지락, 접촉불량, 절연열화에 의한 단락 등에 전기적 발열에 의해서 발생되고 있다[1]. 이러한 화재를 예방하기 위해서 미국에서는 2002년부터 아크차단기의 사용이 일반주택에 설치를 의무화하였으며, UL1699의 기준이 마련되어 아크차단기에 대한 시험방법 등이 규정되어져 있다[2]. 그러나 국내에서는 아직까지 규정화 및 제도가 미미한 실정이다. 일반적으로 저압전선에서 아크가 발생하면, 아크 전류에서 평탄한 영 전류구간이 생기는 것을 볼 수 있다. 직렬아크를 검출하기 위한 방법으로는 주파수분석하여 검출하는 방법과 전압과 전류의 위상 차이를 분석하여 검출하는 방법, 전류의 피크치의 변화율을 분석하여 검출하는 방법, 그리고 영 전류구간의 지속시간을 검출하는 방법이 있다[3-5].

아크 검출을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있지만 전력 계통내에 다양한 고조파들이 존재하기 때문에 정확하게 아크를 검출 하는 데는 한계가 있다. 예를 들어, 정상적으로 작동하는 기기에서 아크가 발생하지 않는 경우에도 아크 전

류와 매우 유사한 특징을 나타낼 수 있으며, 이와 반대로 아크가 진행되고 있지만 정상적으로 흐르는 전류의 특징과 동일할 수 있기 때문이다. 이러한 한계를 해결하기 위하여 최근에 아크 특징 추출을 위해 CZT(chirp zeta transform) 변환[6] 또는 방사기저함수 기반의 신경회로망[7]을 이용하여 아크를 검출하는 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 평균필터와 대역통과필터로 구성된 혼합필터와 주파수 분석을 이용하여 교류의 정상 및 아크를 판단하는 기법을 제안한다. 제안된 방법은 측정된 전류신호를 최대값을 기준으로 정규화를 진행한 후 노이즈 제거를 위한 FIR필터구조의 이동평균필터와 특정 주파수 성분만을 검출하기 위한 IIR필터구조의 대역통과필터를 이용하여 전류신호를 필터링한다. 대역통과 필터링 된 신호를 이용하여 고속 푸리에 변환(FFT)를 실행한 후, 주파수의 크기 성분을 이용하여 총 에너지를 계산한 후, 계산된 에너지의 크기를 이용하여 아크를 검출한다.

2. 제안된 교류 아크검출 방법

2.1 알고리즘 구성도

그림 1에서는 본 논문에서 제안한 혼합필터와 주파수분석 기법을 이용한 교류 아크 검출 기법의 구성도를 나타냈다. 그림 1에서 보는 바와 같이 오실로스코프로 측정한 전류신호에 대해 실효값을 계산한 후, 계산된 실효값에 $\sqrt{2}$ 를 곱한 최대값을 기준으로 파형을 정규화시켰다. 다음 단계로 FIR필터와 IIR필터로 구성된 혼합필터를 이용하여 전류신호를 필터링한다. 여기서 첫 번째 필터는 FIR 구조인 이동평균필터를 적용하여 노이즈 성분 제거를 위해 사용하였다. 다음 단계로 아크가 발생하는 주파수성분만을 선택하기 위하여 IIR 필터 구조인 대역통과필터를 적용한다. 대역통과 필

[†] Corresponding Author : ICT Fusion Green Energy Center
Wonkwang University, Korea

E-mail : partenza@hanmail.net

* Metropolitan Transportation Research Center, Korea
Railroad Research Institute

** Railroad Safety and Certification Center, Korea Railroad
Research Institute

접수일자 : 2017년 10월 23일

최종완료 : 2017년 11월 1일

터링 된 신호를 이용하여 고속 푸리에 변환(FFT)을 실행한 후, 주파수의 크기 성분을 이용하여 총 에너지를 계산하였으며, 계산된 에너지의 크기를 이용하여 아크를 검출한다.

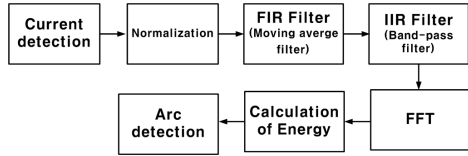


그림 1 아크 검출 구성도
Fig. 1 Configuration of arc detection

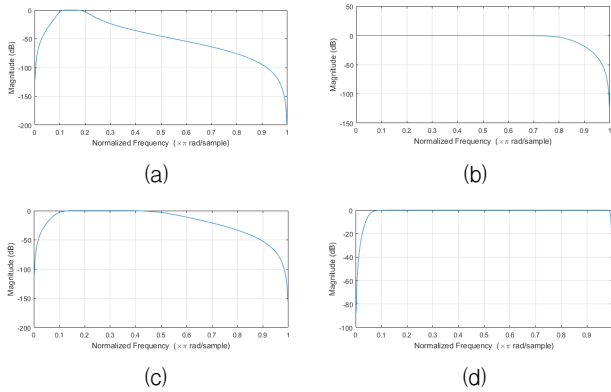


그림 2 다양한 대역통과필터의 주파수 응답
Fig. 2 Frequency response of various band-pass filters

정상상태와 아크상태를 구분하기 위해 대역통과필터를 설계하여야 한다. 교류 신호에 대한 명확한 필터사양이 부족한 관계로 본 논문에서는 표 1 및 그림 2에서 보는 바와 같이 다양한 대역대를 갖는 필터들을 설정하고, 대역통과 필터 대역대에 따른 정상상태와 아크상태의 검출 성능을 비교분석하였다. 또한 대역통과 필터 설계는 3차 Butterworth 필터 구조로 설계하였다.

2.2 FIR 필터와 IIR 필터

FIR 필터는 다른 필터에 비하여 구조가 간단하고, 안정성과 위상이 선형이므로 위상의 왜곡에 강인한 장점이 있다.

표 1 다양한 대역통과 필터 구조

Table 1 Structure of various band-pass filters

Filter type	Frequency range (Normalized frequency)	Structure of filters
filter-1	500-1000Hz (0.1-0.2)	$H(z) = \frac{0.0019 - 0.0087z^{-2} + 0.0087z^{-4} - 0.0029z^{-6}}{1 - 4.848z^{-1} + 10.2498z^{-2} - 12.0485z^{-3} + 8.3007z^{-4} - 3.1805z^{-5} + 0.5321z^{-6}}$
filter-2	0-4000Hz (0-0.8)	$H(z) = \frac{0.5276 - 1.5828z^{-2} + 1.5828z^{-4} - 0.5276z^{-6}}{1 - 1.2399z^{-1} - 1.0972z^{-2} + 1.0094z^{-3} + 0.9544z^{-4} - 0.3487z^{-5} - 0.2780z^{-6}}$
filter-3	500-2500Hz (0.1-0.5)	$H(z) = \frac{0.0985 - 0.2956z^{-2} + 0.2956z^{-4} - 0.0985z^{-6}}{1 - 2.5998z^{-1} + 2.9929z^{-2} - 2.2399z^{-3} + 1.2609z^{-4} - 0.4292z^{-5} + 0.0563z^{-6}}$
filter-4	280-4950Hz (0.056-0.99)	$H(z) = \frac{0.8124 - 2.4373z^{-2} + 2.4373z^{-4} - 0.8124z^{-6}}{1 + 0.2888z^{-1} - 2.5464z^{-2} - 0.4616z^{-3} + 2.2245z^{-4} + 0.1906z^{-5} - 0.66z^{-6}}$

FIR 필터는 식 (1)에서 보는 바와 같이 출력이 귀환되어지는 것이 없이 입력에 의해 출력을 구한다[8].

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_{N-1}x[n-N+1] \quad (1)$$

식 (1)을 Z 변환을 하면 식 (2)와 같다.

$$Y[z] = [b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{N-1}z^{-(N-1)}]X(z) \quad (2)$$

식 (2)에 대한 전달함수를 구하면 식 (3)과 같다.

$$H(z)_{FIR} = \sum_{n=0}^{N-1} b_n z^{-n} \quad (3)$$

식 (1)에 대한 임펄스 응답을 구하면 식 (4)와 같다.

$$h[n] = b_0\delta[n] + b_1\delta[n-1] + \dots + b_{N-1}\delta[n-N+1] \quad (4)$$

$$\begin{matrix} n=0 & h[0] = b_0 \\ & \vdots \\ n=N-1 & h[N-1] = b_{N-1} \end{matrix}$$

따라서 전달함수는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$H(z)_{FIR} = \sum_{n=0}^{N-1} h[n]z^{-n} \quad (5)$$

IIR 필터는 입력뿐만 아니라 출력이 귀환되어지는 구조로, 자신의 과거 값에 영향을 받기 때문에 시스템에 유한한 입력이 들어와도 과거 값이 새로운 입력인 것처럼 계속 영향을 주므로 무한응답이 나오게 된다. IIR 필터의 차분방정식 표현식은 다음과 같다[8].

$$y[n] = \sum_{p=1}^M a_p y[n-p] + \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] \quad (6)$$

식 (6)으로 표현된 IIR 필터의 시스템 함수는 다음과 같이 주어진다. 식 (6)에서 $a_0 = 1$ 로 가정하였다.

$$H(z) = \frac{\sum_{n=0}^M b_n z^{-n}}{\sum_{n=0}^M a_n z^{-n}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (7)$$

식 (7)의 시스템 함수를 다음과 같이 두 부분으로 분리할 수 있다. 식 (7)에서 여기서 $H_1(z)$ 는 전 영점 시스템이고 $H_2(z)$ 는 전 극점 시스템이다.

$$H(z) = \frac{\sum_{n=0}^M b_n z^{-n}}{1 + \sum_{n=1}^M a_n z^{-n}} = \frac{H_1(z)}{H_2(z)} \quad (8)$$

2.3 고속푸리에변환을 이용한 주파수 분석

이산시간신호에 대한 주파수 정보를 획득하기 위하여 이산 푸리에 변환을 수행한다. 고려하는 이산 신호가 동등한 주기로 샘플링 된 경우 데이터 열은 $x(n) = x(0), x(1), x(2), \dots, x[(N-1)]$ 로 쓸 수 있다. 따라서 수열 $x(n)$ 의 이산푸리에 변환은 주파수영역에서 $X(k) = X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$ 의 복소수 값의 시퀀스를 갖는다. 이산시간신호에 대하여 이산 푸리에 변환은 다음과 같이 정의되며, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 을 의미한다.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-kn} \quad (9)$$

이산시간 푸리에 급수 표현식에서 $X[k]$ 을 유도하기 위하여 식 (9)의 양변에 $e^{-j\frac{2\pi}{N}rn}$ 곱한 후 정리하면 식 (10)과 같은 이산시간 푸리에 역변환식을 얻을 수 있다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (10)$$

이산시간 푸리에 변환을 이용하여 $X(k)$ 중에서 하나의 샘플을 얻으려면, 식 (10)에서 보는 바와 같이 N 번의 복소수 계산과 $(N-1)$ 의 복소수 덧셈이 필요하다. 따라서 모든 이산시간 푸리에 계수의 집합을 구하기 위해서는 N^2 번의 복소수 계산과 $N(N-1)$ 의 복소수 덧셈이 필요하므로 처리 속도가 느린 단점이 있다. 특히, 수열의 길이 N 이 클 때는 더욱 비효율적이다. 이러한 이산푸리에 변환의 계산을 효율적으로 하는 알고리즘이 고속푸리에 변환이다[2].

고속 푸리에 변환은 이산 푸리에 변환의 기본적인 구현에서 반복해서 수행하는 계산을 한 번씩만 수행하도록 하여 효율성을 높이는 방법이다. 고속 푸리에 변환은 신호의 길이 N 이 2의 거듭제곱 형태라고 가정한다. N 은 짝수이므로 $N=2L$ 과 같이 나타낼 수 있고, 주파수에 따라서 짝수 번째 샘플과 홀수 번째 샘플로 나누어 이산 푸리에 변환 식에 적용하면 다음과 같다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1, \\ = \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] W_N^{n(2r)} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x[n] W_N^{n(2r+1)} \quad (11)$$

여기서 $0 \leq r \leq N/2-1$ 이며, 짝수 번째 샘플을 $X[2r]$, 홀수 번째 샘플을 $X[2r+1]$ 이라고 하면, 이들 샘플 역시 다음과 같이 두 부분의 합으로 표현할 수 있다.

$$X[2r] = \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] W_N^{n(2r)} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x[n] W_N^{n(2r)} \quad (12)$$

$$X[2r+1] = \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] W_N^{n(2r+1)} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x[n] W_N^{n(2r+1)} \quad (13)$$

여기서 각각 두 번째 덧셈항의 변수를 치환하면 다음과 같다.

$$X[2r] = \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] W_N^{n(2r)} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n+N/2] W_N^{(N/2+n)(2r)} \quad (14)$$

$$X[2r+1] = \sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] W_N^{n(2r+1)} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x[n+N/2] W_N^{(N/2+n)(2r+1)} \quad (15)$$

W_N^{2rn} 의 주기성 때문에 $W_N^{2r(n+N/2)} = W_N^{2rn} W_N^{rN} = W_N^{2rn}$ 이기 때문에 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X[2r] = \sum_{n=0}^{N/2-1} (x[n] + x[n+N/2]) W_N^{nr} \quad (16)$$

$$X[2r+1] = \sum_{n=0}^{N/2-1} (x[n] - x[n+N/2]) W_N^{nr} \quad (17)$$

여기서 다음과 같은 새로운 신호 $g[n]$ 과 $h[n]$ 을 정의한다.

$$g[n] = x[n] + x[n+N/2] \quad (18)$$

$$h[n] = x[n] - x[n+N/2] \quad (19)$$

3. 실험 결과

그림 3에서는 정상상태 및 아크 상태에 따른 전류, 전압, 전극 양단 전압 측정을 위한 실험장치의 구성도를 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 전원 공급을 위하여 220V, 60Hz 교류 전원을 사용하였다. 또한 전원 전압과 전극 양단 전압 측정을 위하여 차동 프로브(Sapphire instruments SI-9002)를 이용하였으며, 전류 측정을 위하여 전류프로브(Pearson Current Monitor, model 101)를 사용하였다. 데이터의 취득은 오실로스코프(Lecroy waverunner 64xi)를 이용하였다. 부하전류에 따른 정상/아크 특성을 분석하기 위하여 전류를 3.75A, 10A, 20A, 40A, 50A로 변경하면서 데이터를 취득하였다.

대역통과필터 구조에 따른 아크 검출성능을 분석하기 위

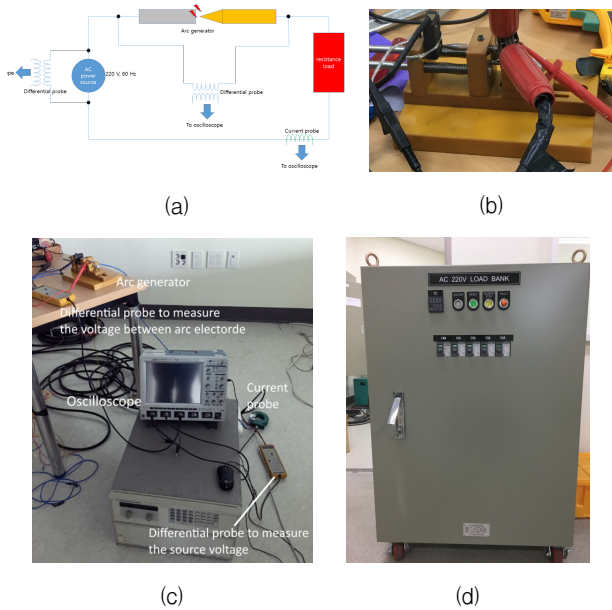


그림 3 아크 발생 실험장치. (a) 실험장치 구성, (b) 아크 발생장치, (c) 아크실험장치, (d) 저항부하기

Fig. 3 Experimental setup. (a) Configuration of arc experimental setup, (b) Series arc generation electrode, (c) Test setup for arc generation, (d) Resistive load

하여 표 2에서 보는 바와 같이 정상상태에서 취득한 전류신호 76개와 아크 상태에서 취득한 전류신호 148개 등 총 224개의 전류신호를 이용하였다. 표 3에서는 224개의 전체 전류신호(정상 76개, 아크 148개)에 대한 아크 검출결과를 나타냈다. 표 3에서 나타낸 바와 같이 혼합필터(평균필터 적용 후 대역통과필터)를 적용한 경우 검출성능이 97.32[%]로 가장 높게 나타났다.

표 2 정상데이터와 아크 데이터 구성

Table 2 Data configuration for normal and arc data

Load current	Number of data for normal condition	Number of data for arc condition
3.75A	44	22
10A	12	72
20A	6	30
40A	8	14
50A	6	10
Sum	76	148

표 3에서 보는 바와 같이 평균필터 적용유무에 한정하여 검출성능을 분석하면, 평균필터를 적용한 경우 검출성능이 79.91[%]로 나타난 반면에 평균필터를 적용한 경우 검출성능이 66.52[%]로 저하됨을 알 수 있다. 대역통과필터만을 적용한 경우를 한정하여 검출성능을 분석하면, 통과대역주파수가 500-2500[Hz] 일 때 검출성능이 88.84[%]로 나타난 반면에 직류성분을 포함할 경우(통과대역주파수 : 0-4000Hz) 검출성능이 67.41[%]로 떨어짐을 알 수 있다. 혼합필터를 적용

한 경우를 한정하여 검출성능을 분석하면, 직류성분을 포함할 경우(통과대역주파수 : 0-4000Hz) 검출성능이 다른 통과대역 주파수에 비하여 현저하게 저하됨을 알 수 있다.

표 3 필터 구조에 따른 검출 성능

Table 3 Detection performance according to filter structures

Condition	Filter structures	Detection performance
Average filter	no application	79.91[%]
	application	66.52[%]
Band-pass filter	filter range (500-1000 Hz)	78.57[%]
	filter range (0-4000 Hz)	67.41[%]
	filter range (500-2500 Hz)	88.84[%]
Combined filter	filter range (280-4950 Hz)	84.82[%]
	filter range (500-1000 Hz)	85.27[%]
	filter range (0-4000 Hz)	66.07[%]
	filter range (500-2500 Hz)	92.86[%]
	filter range (280-4950 Hz)	97.32[%]

그림 4에서는 필터 적용에 따른 임계값에 따른 검출성능을 나타냈다. 그림 4에서 보는 바와 같이 평균필터와 대역통과필터를 적용한 경우 필터를 적용하지 않은 경우에 비하여 정상신호와 아크신호에 대한 주파수 에너지 값의 차별성이 큼을 알 수 있다. 평균필터와 대역통과필터로 구성된 혼합필터를 적용한 경우 정상과 아크의 판단 기준값인 임계치는 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 0.0346로 설정하였다.

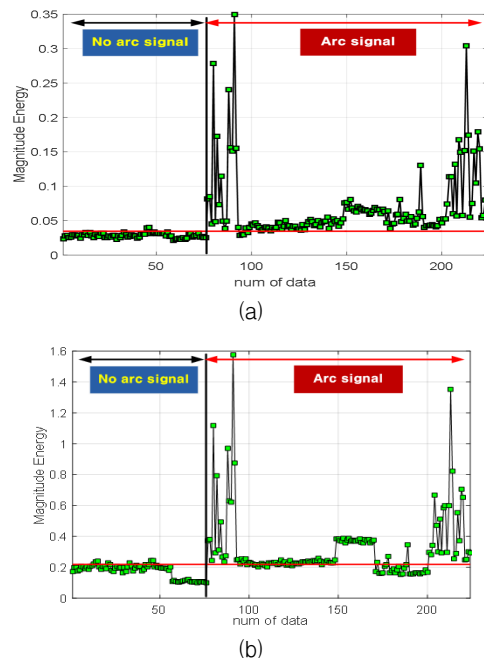


그림 4 필터 적용에 따른 정상신호와 아크신호의 주파수 에너지, (a) 혼합 필터 적용, (b) 필터 적용하지 않은 경우

Fig. 4 Frequency energy for normal and arc signals according to application of filter (a) with filter and (b) without filter

그림 5에서는 혼합필터를 적용하였을 때 정상신호이지만 아크로 판단한 샘플의 전류파형, 공급전원파형 및 전극 양단의 파형을 나타냈다. 파형 형태만을 고려하면 아크 상태에서 나타나야 할 특성이 전혀 보이지 않았다. 그림 5에 나타난 파형 중에서 전류신호에 대한 주파수 에너지 크기는 0.0393으로, 정상과 아크의 판단기준인 임계값 0.0346보다 높게 나타난 아크로 판단되었다. 그러나 주파수 에너지 크기가 임계값에 매우 근접해 있음을 알 수 있으며, 이럴 경우에는 이분법적 판단보다는 다음 신호의 특성을 참조하여 진단이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 그림 6에서는 아크신호를 정상으로 판단한 샘플의 전류파형, 공급전원파형 및 전극 양단의 파형을 나타냈다. 그림 6에 나타난 파형 중에서 전류신호에 대한 주파수 에너지 크기는 0.0296으로 임계값 0.0346보다 작은 값을 나타냈다. 그림 6에 나타난 전류파형에 대한 주파수 에너지 값이 작은 이유는 고려대상인 3개의 정현파 중에서 매우 짧은 순간에 아크가 발생되었기 때문이다. 이럴 경우에는 이분법적 판단보다는 다음 신호의 특성을 참조하여 진단이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

그림 7에서는 주파수 에너지 값(0.168)이 판단기준인 임계값보다 매우 큰 신호의 파형을 나타냈다. 그림 7에서 보는 바와 같이 아크 신호가 지속적으로 발생됨을 확인할 수 있다. 따라서 판단하고자 하는 신호의 주파수 에너지가 임계값 부근에 존재할 경우 단일 파형만을 고려하여 진단을 즉시 수행하지 않고 다음 신호 몇 주기를 고려한 후 아크판단을 진행하여야 할 것으로 판단된다. 또한 주파수 에너지 값이 임계값보다 매우 큰 경우 다음 신호 고려 없이 즉시 아크로 판단이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 즉, 임계값에 따른 확률적 판단보다는 주파수 에너지의 크기에 따라 차별화된

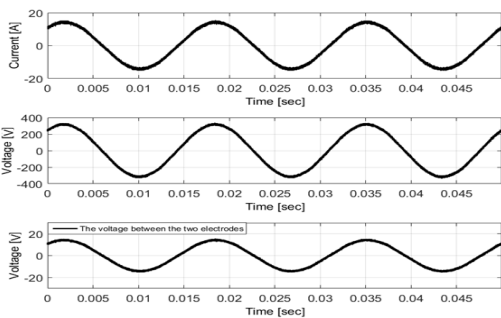


그림 5 정상신호를 아크로 판단한 파형
Fig. 5 Waveform of normal signal determined as arc state

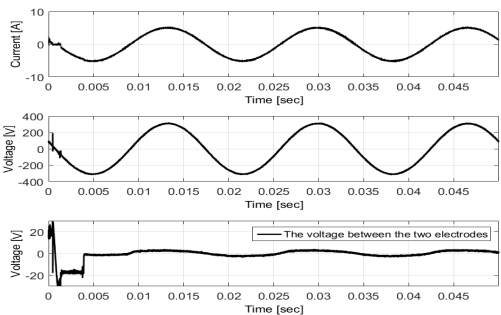


그림 6 아크신호를 정상으로 판단한 파형
Fig. 6 Waveform of arc signal determined as normal state

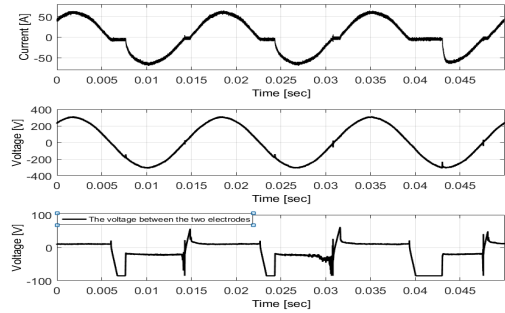


그림 7 주파수 에너지 값이 높은 아크 파형
Fig. 7 Waveform of arc signal with higher frequency energy

진단규칙을 설계하는 것이 아크진단을 하는데 더 효과적인 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 평균필터와 대역통과필터로 구성된 혼합필터와 주파수 분석을 이용하여 교류의 정상 및 아크를 판단하는 기법을 제안하였다. 실험결과 혼합필터를 적용한 경우 검출성능이 97.32[%]로 나타나 필터를 적용하지 않은 경우에 비하여 17.41[%] 향상된 진단 성능을 나타냈다. 제안방법에 의하여 정상이지만 아크로 판단된 신호 또는 아크이지만 정상으로 판단된 신호에 대한 주파수 에너지크기를 분석한 결과 주파수 에너지 크기가 임계값에 매우 근접해 있음을 알 수 있었다. 또한, 아크 상태가 지속적인 경우 주파수 에너지 값이 상대적으로 크게 나타났음을 알 수 있었다. 따라서 판단하고자 하는 신호의 주파수 에너지가 임계값 부근에 존재할 경우 단일 파형만을 고려하여 진단을 즉시 수행하지 않고 다음 신호 몇 주기를 고려한 후 아크판단을 진행하여야 할 것으로 판단된다. 또한 주파수 에너지 값이 임계값보다 매우 큰 경우 다음 신호 고려 없이 즉시 아크로 판단이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 향후 설계통의 다양한 환경에서 취득한 데이터를 이용하여 제안된 알고리즘 평가 및 개선을 지속적으로 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accidents in 2013," 2014
- [2] Underwriters Laboratories, "Standard 1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters," 2006.
- [3] Restrepo, Carlos E. "Arc fault detection and discrimination methods," IEEE Conf. on Electrical Contacts, pp.115-122, 2007.
- [4] G. D. Gregory, Kon Wong and R. F. Dvorak, "More

about arc-fault circuit interrupters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 1006-1011, 2004.

- [5] Jeongwoon Ahn, Yong-Taek Oh, "Series Arcing Fault Detection Method Using Harmonics Analysis of Supply Current," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 28, no. 12, pp. 30-37, 2014.
- [6] Giovanni Artale, Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino, Dario Di Cara, Salvatore Nuccio, and Giovanni Tinè, "Arc Fault Detection Method Based on CZT Low-Frequency Harmonic Current Analysis," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 5, pp. 888-896, 2017.
- [7] Yu-Wei Liu, Chi-Jui Wu, Yi-Chieh Wang, "Detection of serial arc fault on low-voltage indoor power lines by using radial basis function neural network," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 83, pp. 149 - 157, 2016.
- [8] Vinay K. Ingle, John G. Proakis, *Digital Signal Processing using Matlab*, Thomsom, 2007.
- [9] Oppenheim, Schafer, *DISCRETE-TIME SIGNAL*



이 강 원(Kang-Won Lee)

1970년 2월 21일생 1995년 충북대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국철도기술연구원 철도안전인증연구소 책임연구원
E-mail : wklee@krii.re.kr

저 자 소 개



장 동 옥(Dong-Uk Jang)

1976년생. 1998년 충북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000.08.~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
주요 관심분야 : 고전압 방전현상, 전기철도, 설비진단, EMI/EMC



박 성 희(Seong-Hee Park)

충북대학교 전기공학과 학사
충북대학교 전기공학과 석/박사
前 LS 전선(2007~2014)
現 원광대학교 ICT 융합 그린에너지 연구원(2017~현재)
주요 관심분야 : 고전압 방전, 전기절연재료, 설비진단