

주파수 분석을 이용한 태양광 설비의 아크 검출 기법

Arc Detection Method of Photovoltaic System using Frequency Analysis

김 상 규* · 지 평 식†
(Sang-Kyu Kim · Pyeong-Shik Ji)

Abstract - There is a little research on DC arc detection when compared to a large number of literature and patents on AC arc detection. However, as DC energy sources such as photovoltaic power generation facilities and fuel cells are introduced, research on DC arc has become as important as AC arc detection in terms of circuit protection and system reliability enhancement. In this paper, we have developed an arc detection method for photovoltaic system using frequency analysis. Through various experiments, it was confirmed that the proposed method effectively detects the arc.

Key Words : Arc Detection, Photovoltaic system, Frequency Analysis, Solar energy

1. 서 론

태양광 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 여러 개의 PV 패널이 직렬 및 병렬로 전선과 커넥터에 의해 연결되어 있다. 각각 병렬로 연결된 PV 패널은 태양광 접속함에 공통으로 연결되어 인버터에 전력을 공급한다[1, 2]. 그러나 PV 패널 사이에 연결하는 커넥터의 연결부위가 열화 및 진동으로 인해 불안정한 체결상태가 될 경우 아크가 발생하여 화재로 이어질 수 있다. 또한, 태양광 접속함에 연결된 체결부위에서 접촉 불량이나 발생할 경우 그림 2와 같은 다양한 화재사고로 이어진다[3, 4].

태양광 접속함의 고장 원인은 여러 가지가 있지만, 반도체 스위칭 소자와 접속부분에 열에 의한 화재, 접속함 내 습기로 인한 단선, 체결부위의 느슨함 등이 있다. 아크 발생은 대규모 태양광 설비뿐만 아니라 소규모 주거용 설비에도 존재하므로 안전에 중대한 위협이 될 수 있다. 따라서 아크 결함을 자동으로 검출하고, 아크 발생시 자동으로 전원을 차단하고 담당자에게 아크 발생사실을 통지하는 장치의 개발은 안전한 태양광 설비 사용을 위해 매우 중요하다.

태양광 설비에서 아크검출을 위해 FFT 기반의 주파수 분석기법[5]과 웨이블릿 다해상도 기법을 적용한 방법[6-9]이 주로 적용된다. 주파수분석기법에서는 입력신호에 대한 대역통과 필터 적용 후 FFT 변환 후에 변환된 주파수 크기 정보를 이용하는 방법이 주로 이용된다. 웨이블릿 다해상도 기법에서는 입력신호를 웨이블릿 변환하여 주파수 해상도별로 분해한 후에 얻어진 계수정보를 이용하여 아크를 검출한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea

E-mail : psji@ut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation

접수일자 : 2017년 7월 31일

최종완료 : 2017년 8월 16일

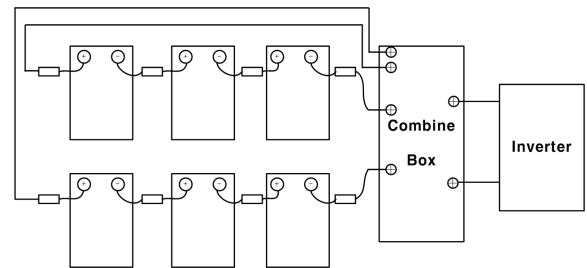


그림 1 태양광 발전시스템
Fig. 1 Photovoltaic system



그림 2 태양광 접속함에서의 다양한 사고 사례
Fig. 2 Examples of various accidents in combine boxes

다. 본 논문에서는 주파수 분석기법을 이용하여 태양광 설비의 아크검출 방법을 제안한다. 제안된 방법은 아크 특정 주파수 성분을 검출하기 위하여 대역통과필터를 통과한 신호에 대한 주파수 성분의 총 에너지를 이용하여 아크를 검출한다.

2. 태양광 설비의 아크 검출 기법

2.1 알고리즘 구성도

그림 3에서는 본 논문에서 제안한 아크 검출을 위한 구성도를 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 Pulse사의 전류

검출센서를 이용하여 전류를 검출한 후, 노이즈 등을 제거하기 위하여 대역통과필터를 적용한다. 대역통과 필터링 된 신호를 이용하여 디지털 푸리에 변환(DFT)을 실행한 후, 주파수의 크기 성분을 이용하여 아크를 검출한다.

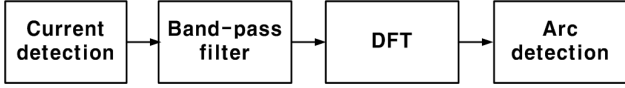


그림 3 아크 검출 구성도
Fig. 3 Configuration of arc detection

그림 4에서는 본 논문에서 전류검출을 위해 사용한 전류센서(PA3655NL)의 외형과 결선도를 나타냈다. 그림 4(b)의 결선도에서 1번 단자와 10번 단자에 부하전선을 연결하고, 3번 단자와 7번 단자에서 오실로스코프를 이용하여 전류 신호를 취득한다. 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 입력측의 전류 변화가 없다면 센서 출력측 신호는 0이 되며, 전류 변화율이 클수록 센서로부터 취득되는 신호의 진폭은 증가됨을 알 수 있다.

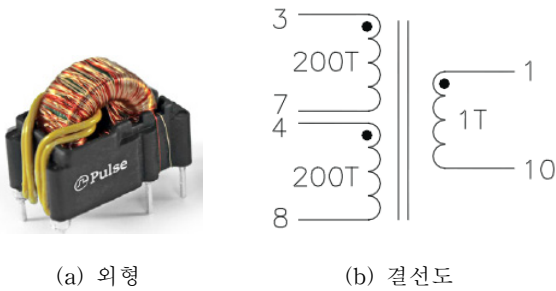


그림 4 전류센서의 외형과 결선도
Fig. 4 Appearance and wiring diagram of current sensor

2.2 DTF를 이용한 주파수 분석 및 아크 검출 기법

시간에 따라 관측되는 시계열(time series)에서는 주기성을 가지고 있는 경우가 많다. 주기함수들중 대표적인 것은 사인함수와 코사인함수와 같은 삼각함수이다. 일반적으로 신호는 여러 형태의 주기를 갖는 함수들이 혼합되어 나타난다. 즉, 임의의 함수들은 푸리에급수(Fourier series)라고 불리는 삼각함수들의 1차 결합으로 표현된다[10].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

여기서, T 는 주기함수의 주기이고, a_0 , a_n , b_n 은 푸리에계수이다. 위 관계식을 오일러정리를 적용하여 복소푸리에급수(complex Fourier series)로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \quad (2)$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt$$

이와 같은 푸리에급수 전개를 이용하면 주기적인 시간함수에 대한 주파수 정보를 얻을 수 있지만 실제 문제에서는 주기적이지 않은 함수를 포함하는 경우가 많다. 따라서 이와 같은 비주기함수에 푸리에급수를 적용을 일반화하는 문제가 제기된다. 주기함수해석을 비주기함수해석으로 확장은 임의의 주기함수의 주기를 무한대로 보냄으로써 수행된다. 즉, 주기 T 가 무한대로 되면 그 함수는 반복적인 형태로 될 수 없으므로 비주기함수가 된다. 이러한 개념을 이용하여 식 (1)을 변환하면 식 (3)과 같이 표현되는데, 이것을 푸리에적분(Fourier integral)이라 한다.

$$f(t) = \int_0^{\infty} [A(\omega) \cos \omega t + B(\omega) \sin \omega t] d\omega \quad (3)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \cos(\omega v) dv$$

$$B(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(v) \sin(\omega v) dv$$

이산시간신호인 경우 데이터열은 $x(n) = x(0), x(1), x(2), \dots, x[(N-1)]$ 로 쓸 수 있다. 따라서 수열 $x(n)$ 의 이산푸리에변환은 주파수영역에서 $X(k) = X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$ 의 복소수 값의 시퀀스를 갖는다. 이산시간신호에 대하여 이산 푸리에 변환과 역변환은 다음과 같이 정의 된다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (4)$$

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

여기서, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 이고 k 는 변환요소의 고조파 수를 나타낸다. 그리고 이산시간신호에 대한 DFT의 k 번째 요소와 $k+N$ 번째 요소 사이에는 다음과 같은 성질이 있다. 따라서 DFT에 의해 주기 N 마다 같은 신호가 된다는 것을 알 수 있다.

$$X(k+N) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi(k+N)n}{N}} \quad (5)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} e^{-j 2\pi n}$$

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

아크 검출 기법은 대역통과 필터 후 전체 구간에 대한 주파수 크기를 모두 합산한 총 에너지 값을 이용하여 정상신호와 아크 신호를 판별하였다. 즉, 총 에너지 값이 0.3×10^{-3} 보다 같거나 크면 아크로 판정하고, 이 값보다 작으면 정상신호로 판정하였다. 임계값에 대한 판정근거는 다음 장에서 설명한다.

3. 실험 결과

그림 5에서는 아크 신호 검출을 위한 실험장치를 나타냈다. 그림 5에서 보는 바와 같이 직류 전원 공급을 위해 RSP-1000-48(1000W, 48V, Max 21A) SMPS를 이용하였다. 부하저항은 500[W], 2[Ω] 3개를 직렬 연결하였으며, 전류 센서는 Pulse 사의 PA3655NL를 이용하였으며, 전류 센서 전원은 DC 전압 공급기를 사용하였다. 아크는 커버 나이프 스위치를 이용하여 발생시켰으며, 센서 출력신호는 오실로스코프 (WaveSurfer 3024, sampling rate 4Gs/s)를 이용하여 센서 출력단의 전압을 측정하였다.

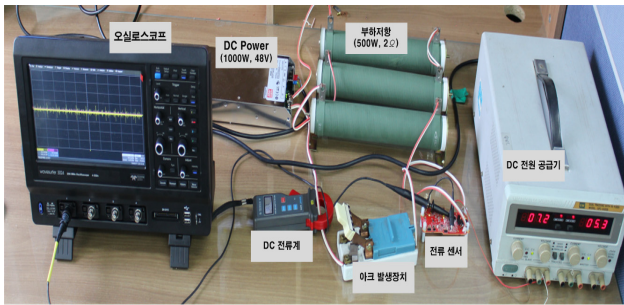
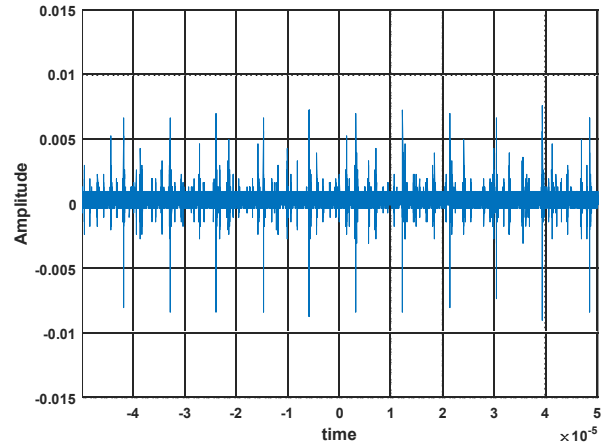


그림 5 실험 장치 구성
Fig. 5 Configuration of experimental apparatus

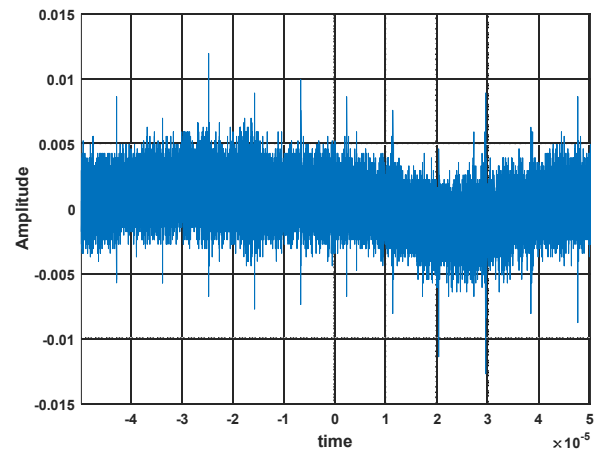
그림 6에서는 아크가 발생하지 않은 취득한 정상 신호와 아크 발생할 때 취득한 아크 신호를 나타냈다. 각각 취득한 신호의 샘플링 주파수는 1G[Hz]로 100[μs]동안 신호를 취득하였다. 따라서 그림 6에 나타난 신호의 총 받은 데이터는 100,000개임을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 센서는 유도 결합 형태로 순수한 직류 성분일 경우 센서 출력은 0이 된다. 그러나 그림 6(a)에 나타난 정상신호를 보면, 노이즈 성분이 상당히 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 전원공급에 사용된 SMPS에서 상당한 고조파 성분을 발생시킴을 알 수 있다. 이는 현장에 설치된 태양광 설비에도 계통의 고조파 또는 날씨의 변화 등에 의해 전류가 변하여 센서 출력값이 0이 아닐 경우도 발생하므로 본 실험의 환경과 실제 현장 설비의 환경의 차이 및 그에 따른 파형의 특성 분석을 향후에 진행하고자 한다.

그림 6에 나타난 신호를 이용하여 2048개씩 데이터를 나누어 주파수 분석을 실행하여 총 48(100,000/2048)개의 신호를 이용하여 아크가 없을 때와 아크가 발생했을 때의 주파수 특성을 분석하였다. 그림 7에서는 그림 6에 나타난 전체 파형에서 처음 2048개를 대상으로 정상 신호와 아크 신호에 대한 파형을 나타냈다. 아크 발생 시에 정상 신호에 비해 고조파 성분과 진폭의 크기가 커짐을 알 수 있다.

그림 8에서는 그림 7에 나타난 신호에 대한 주파수 분석 결과를 나타냈다. 그림 8에서 보는 바와 같이 정상신호와 아크 신호는 약 140[MHz] 이하에서 주파수 크기의 성분의 차이는 있지만 해당되는 주파수를 갖는 고조파 성분이 있음을 알 수 있다. 또한 두 신호 모두 250[MHz] 이상에 해당하는 고조파 성분은 존재하지 않음을 알 수 있다. 정상 신호와 아크 신호에 대한 주파수 성분의 주요 차별성은 그림 8에서 보는 바와 같이 139.6[MHz]~252.4[MHz] 주파수 대역대로 정상신호는



(a) Normal signal



(b) Arc signal

그림 6 정상 신호와 아크 신호에 대한 파형
Fig. 6 Waveform for normal and arc signals

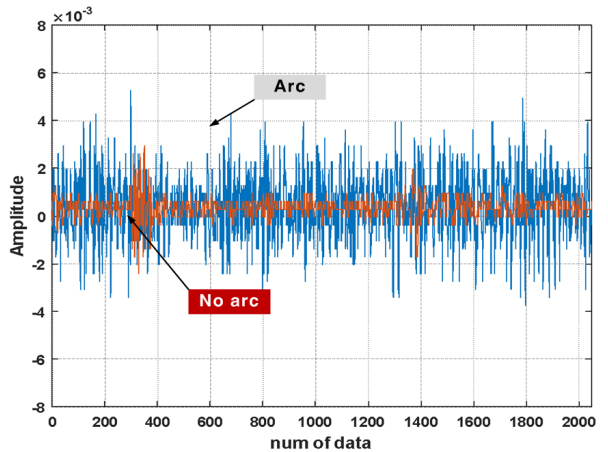


그림 7 정상 신호와 아크 신호에 대한 파형(2048개 데이터)
Fig. 7 Waveform for normal and arc signals (2048 data)

이 주파수 대역에 대한 고조파 성분은 발생하지 않지만, 아크 신호는 이 주파수 대역에 대한 고조파 성분이 크게 발생한다는 점이다.

본 논문에서는 이 대역대의 특성을 이용하여 정상신호와 아크신호를 구분하고자 한다. 따라서 대역통과필터를 이용하여 139.6[MHz]~252.4[MHz] 주파수 대역에 신호는 통과하고, 그 미만, 또는 초과되는 주파수 성분을 갖는 신호를 제거하고자 3차 Butterworth 대역통과필터를 적용하였다. 그림 9에서는 설계된 3차 Butterworth 대역통과필터의 주파수 응답 특성을 나타냈다. 그림 10에서는 센서로부터 취득한 2048개의 데이터(그림 8에 나타낸 신호)를 대역통과 필터 적용한 후 주파수 분석한 결과를 나타냈다. 그림 10에서 보는 바와 같이 139.6[MHz]~252.4[MHz] 주파수 대역대에 있는 신호만 통과되고 그 이외의 주파수 성분에 대한 신호는 제거되었음을 확인할 수 있다.

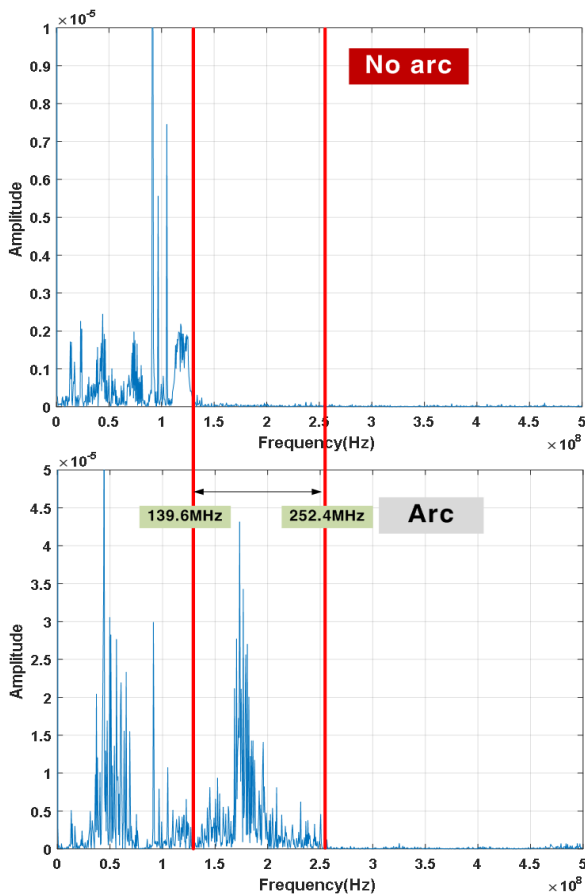


그림 8 그림 7에 나타낸 신호에 대한 주파수 분석
Fig. 8 Frequency analysis for the signal shown in Fig. 7

그림 10에 나타낸 바와 같이 대역통과 필터와 전체 주파수 스펙트럼 구간에서 아크가 발생하지 않은 정상신호의 주파수 크기는 매우 적은 반면에 아크 발생시 취득한 아크 신호에 대한 주파수 크기는 상대적으로 큼을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 대역통과 필터 후 전체 구간에 대한 주파수 크기를 모두 합산한 총 에너지 값을 이용하여 정상신호와 아크 신호를 판별하고자 한다. 그림 11에서는 각각 48개로 구성된 정상신호와 아크신호에 대한 총 에너지 값을 나타냈다. 그림 11에서 보는 바와 같이 아크 발생시 총 에너지의 최소값은 약 0.6×10^{-3} 으로 나타났으며, 정상신호에 대한

주파수 분석을 이용한 태양광 설비의 아크 검출 기법

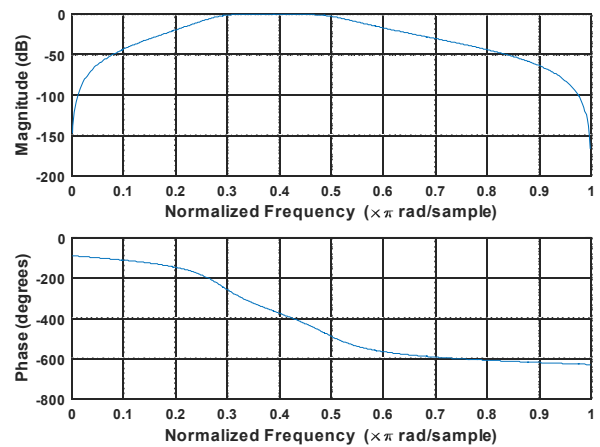


그림 9 3차 Butterworth 대역통과필터의 주파수 응답 특성
Fig. 9 Frequency response of a third-order Butterworth band-pass filter

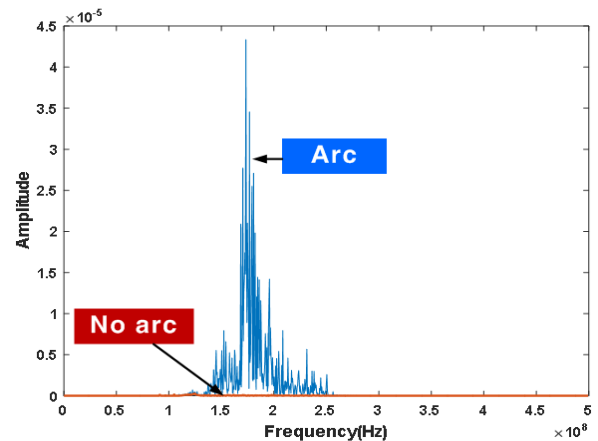


그림 10 대역통과 필터 적용 후의 주파수 특성
Fig. 10 Frequency characteristics after applying a band-pass filter

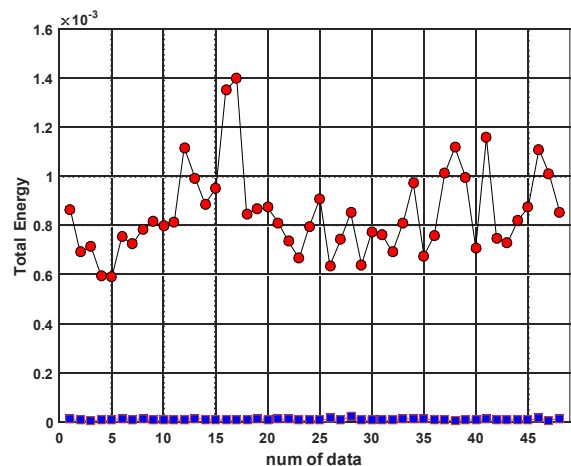
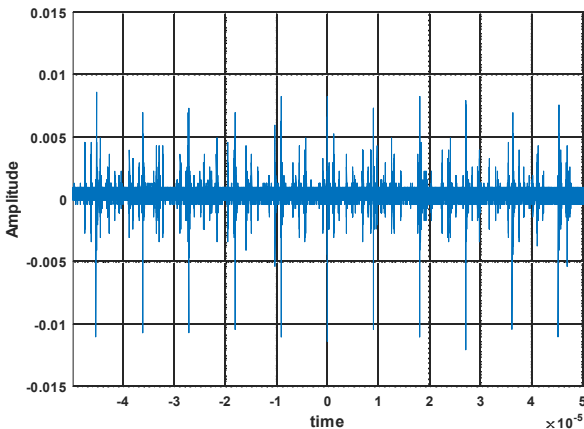


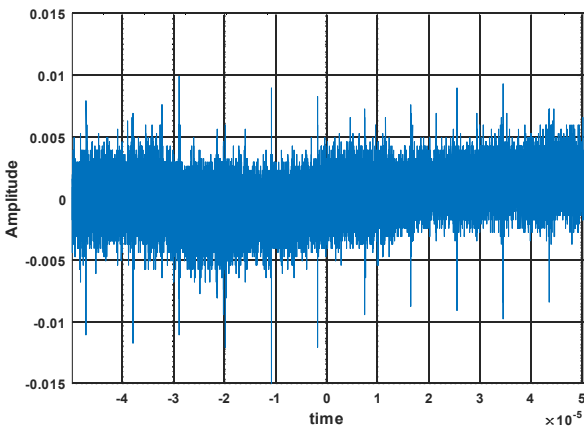
그림 11 정상신호와 아크신호에 대한 총 에너지
Fig. 11 Total energy for normal and arc signals

총 에너지 최대값은 0.01×10^{-3} 으로 나타났다. 따라서 아크 발생시 총 에너지의 최소값과 정상 신호시 총 에너지 최대값을 기준으로 임계값을 0.3×10^{-3} 으로 설정하여 아크신호와 정상신호를 검출하고자 한다.

그림 12에서는 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 새롭게 취득한 검증 데이터의 파형을 나타냈다. 그림 12에 나타난 신호를 2048개로 구분하여 총 48개의 신호로 구분한 후, 대역통과필터 적용 후 주파수분석을 하고, 총 에너지를 구한 결과를 그림 13에 나타냈다. 그림 13에서 보는 바와 같이 임계값(0.3×10^{-3})을 적용하여 정상신호와 아크신호에 대해 판별한 결과 100[%] 모두 정상 또는 아크 신호를 검출하였다.



(a) Normal signal



(b) Arc signal

그림 12 알고리즘 검증을 위해 취득한 정상 신호와 아크 신호에 대한 파형

Fig. 12 The waveform for the normal and arc signals acquired for algorithm verification

4. 결 론

본 논문에서는 주파수 분석을 이용한 태양광 설비의 아크 검출 기법을 제안하였다. 실험결과 특정 대역에서 정상신호와 아크 신호에 대한 차별성이 존재하여 대역통과필터를 적용 후 주파수에 대한 총 에너지값을 기준으로 정상 또는

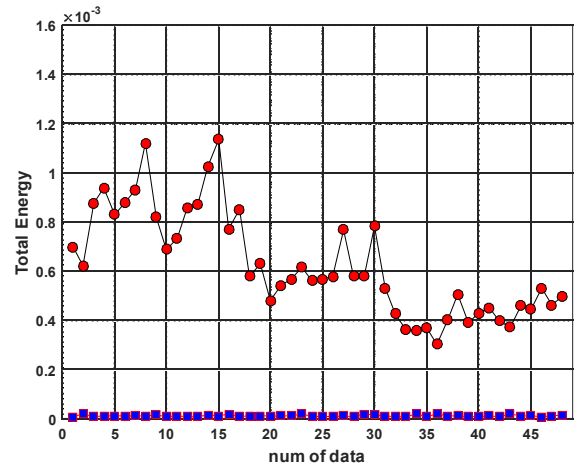


그림 13 검증데이터의 정상신호와 아크신호에 대한 총 에너지
Fig. 13 Total energy for normal and arc signals (test data)

아크 신호에 대한 판별을 실행하였다. 실험결과 본 논문에서 고려한 데이터에 대해서는 100[%] 판별성능을 나타냈다. 본 논문에서는 SMPS로부터 전원을 공급받아 향후 실제 태양광 설비로부터 취득한 데이터와 상관성을 분석할 필요가 있다. 또한 DSP를 이용하여 아크 검출 보드를 개발하기 위해서는 MHz 대역이 아닌 KHz 대역에서 정상신호와 아크신호에 대한 차별성을 살펴볼 필요가 있다. 향후 위에 설명한 환경 외에 다양한 고조파가 존재하는 환경에서도 정상/아크 신호 검출을 위한 알고리즘 평가 및 개선을 지속적으로 연구하고자 한다.

References

- [1] Hee-Sun Kim, Song-Yop Hahn, Hoo-Sek Han, "Development of DC Leakage Current Sensor for Solar Power Generation System," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 6, pp. 828-833, 2014.
- [2] Chan-Eom Park, Jin-Soo Jung, Un-Ki Han, Hyun-Sung Lim, Young-San Song, "An Assessment on Effect of Facility and Electrical Safety During the Flooding of the Photovoltaic Power System", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol 28, no, 12, pp. 38-44, 2014.
- [3] K. Koziy, B. Gou, and J. Aslakson, "A low-cost power-quality meter with series arc-fault detection capability for smart grid," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 3, pp. 1584-1591, 2013.
- [4] Silei Chen, Xingwen Li, Jiayu Xiong, "Series Arc Fault Identification for Photovoltaic System Based on Time-Domain and Time-Frequency-Domain Analysis," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 4, pp. 1105-1114, 2017.
- [5] Kun Xia, Zihui He, Yin Yuan, Yiming Wang, Po Xu, "An Arc Fault Detection System for the Household

- Photovoltaic Inverter according to the DC Bus Currents," *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1687-1690, 2015.
- [6] Xiu Yao, Luis Herrera, Jin Wang, "A series DC arc fault detection method and hardware implementation," *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2444-2449, 2013.
- [7] Zhan Wang, Robert S. Balog, "Arc Fault and Flash Detection in DC Photovoltaic Arrays Using Wavelets," *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 1619-1624, 2013.
- [8] Guo Yunmei, Wang Li, Wu Zhuoqi, Jiang Binfeng, "Wavelet packet analysis applied in detection of low-voltage DC arc fault", *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 4013-4016, 2009.
- [9] Xiu Yao, Luis Herrera, Yi Huang, Jin Wang, "The detection of DC arc fault: Experimental study and fault recognition," *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1720-1727, 2012.
- [10] R.N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2000.

저 자 소 개



김 상 규 (金 相 圭)

2000년 한국교통대학교 전기공학과 졸업 (공학사), 2014년 2월 동 대학교 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2016년 2월 동 대학원 박사과정 수료, 현재 (주)케이피엔 안전진단기술원 대표이사

E-mail : space6922@hanmail.net



지 평 식 (池 平 植)

1994년 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사), 1998년 동대학원 박사과정 졸업(공학박사), 현재 한국교통대학교 전기공학과 교수

E-mail : psji@ut.ac.kr