

50kW 태양광 설비의 아크 검출 알고리즘 개발

Development of Arc Detection Algorithm for 50 kW Photovoltaic System

김 상 규* · 이 창 성** · 지 평 식†

(Sang-Kyu Kim · Chang-Sung Lee · Pyeong-Shik Ji)

Abstract - In this paper, we developed an algorithm to detect arc of PV power plant through frequency analysis. For arc detection based on frequency analysis, the filter should be designed to emphasize the difference between the arc state and the normal state. Therefore, in this paper, we analyzed the arc detection performance according to various filter structures. The arc detection algorithm developed in this paper extracts the filtering signal on current by using various filters and then calculates the frequency components and total energy using the FFT. In the final step, the arc is detected using the calculated energy magnitude. In order to verify the performance of the proposed arc detection algorithm, experiments were conducted on 51 kW solar inverters connected to power line. Through various experiments, it was confirmed that the proposed method effectively detects the arc.

Key Words : Arc detection, Photovoltaic system, Frequency analysis, Solar energy, Arc fault interruption

1. 서 론

친환경 에너지 정책으로 인하여 태양광 발전설비는 지속적으로 증대되고 있다. 태양광 발전설비의 증대와 더불어 전력 아크에 의한 사고를 예방하기 위한 안정성 문제가 제기되고 있다. 태양광 발전설비에서 전기 배선이나 태양광 패널 간 연결을 위해 사용되는 다수의 커넥터 등에서 예기치 못한 고장이 발생했을 때 아크가 발생할 수 있다. 아크가 발생하면 설치물로 전류가 흘러 감전의 위험성이 존재한다. 또한 화재를 발생시켜 태양광 발전설비를 손상시키거나 대규모 재산상의 손해를 초래한다. 이러한 아크 결함의 문제는 대규모 유틸리티 시스템뿐만 아니라 소규모 주거 시스템에도 존재하며 인간의 안전에 중대한 위협이 될 수 있다. 이 문제가 존재하는 한 태양광 에너지의 보급에 심각한 우려를 나타낸다. 따라서 아크 결함 감지는 안정적이고 안전한 태양광 발전시스템의 운영을 위해 매우 중요하다.

태양광 발전설비에서 아크 문제를 다루기 위하여 북미에서는 NEC (National Electrical Code) 690에 “옥상 PV 어레이에서 직렬 아크 결함 보호” 조항이 기술되었다[1]. 또한, UL 1699B에서 아크 검출 및 차단 성능을 평가하기 위한 시험을 상세히 기술하였다. UL 1699B는 미국의 NEC 제 690조에 포함된 조항으로 UL 1699 “Arc Fault Interruption” 표

준에 추가된 것이다. UL 1699B는 80 V 이상에서부터 1,000V 미만의 DC 전압을 이용하는 시스템에 대한 요구사항들을 정의하고 있다[2]. 따라서 북미는 태양광 발전설비는 아크검출 기능을 갖는 차단기의 사용을 의무화하고 있으나, 국내의 경우에는 아크 검출기능에 대한 규정이 마련되어 있지 않다. 태양광 설비의 아크 검출을 위해 Alam 등은 PV 시스템에 대한 다양한 결함의 원인을 조사하고 아크 검출 방법의 특징을 비교 분석한 논문을 발표하였다[3]. 이 논문에서는 지락, 선간 결함 및 아크 결함을 상세히 기술하였으며, 접지 및 접지되지 않은 PV 어레이는 화재를 방지하기 위해 다양한 고장 감지 및 완화 기술을 사용해야 한다고 기술하고 있다. 또한 기존 아크 검출 기술의 일부 한계로 인해 지락이 감지되지 않아 PV 어레이 및 주변 환경에 심각한 손상을 줄 수 있다고 기술하고 있다. 일반적으로 태양광 설비의 아크 검출은 주파수 분석기법을 이용한다[4-8]. 참고문헌 [4]와 [5]에 따르면 아크 잠음은 정상적일 때 잠음과 중첩되며 아크에 의해 생성된 잠음은 핑크 잠음 특성을 갖는다고 기술되어 있다. 또한 참고문헌 [5]와 [6]에 따르면, 0.1-100 kHz의 주파수 대역은 나머지 현재 스펙트럼보다 직렬 아크 검출에 유용하다고 기술되고 있다. 또한, 아크 결함 위치와 아크 검출기 위치는 아크 검출 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다[5].

참고문헌 [5]에서는 또한 직렬 아크가 존재할 때 PV 스트링 전류의 스펙트럼이 인버터 생성 잡음, 도체 길이의 영향, 전류의 접촉 수 및 PV 패널 수와 같은 여러 요소의 수에 따라 달라짐을 보여주었다. 그러나 아크 결함 위치 및 아크 검출기의 위치가 패널 전류의 주파수 스펙트럼에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 참고문헌 [8]에서는 실제 계통이 아닌 전원공급기를 이용한 아크검출 성능평가를 실행하였다.

직렬 아크를 검출하는데 주파수 스펙트럼을 이용하였을 때 주요 단점은 모든 특정 PV 시스템에 대해 보정해야한다

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

E-mail : psji@ut.ac.kr

* KP & Safety Diagnosis Institute, Korea

** Semyeong ENG Ltd., Korea

접수일자 : 2018년 2월 5일

수정일자 : 2018년 2월 13일

최종완료 : 2018년 2월 22일

는 것이다. 이는 직렬 아크가 있는 경우와 없는 경우의 스펙트럼의 차이가 작동 조건에 따라 변하기 때문이다. 또한 참고문헌 [9]에서는 아크 검출 성능은 PV 패널 시뮬레이터가 아닌 실제 PV 패널이 있는 시스템에서 시험되어야 한다고 주장하고 있다. 결과적으로 한 인버터와 한 세트의 작동 조건에 대해 보정된 주파수 기반 알고리즘이 다른 작동 조건에서 제대로 작동하지 않을 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 주파수 분석기반의 태양광 발전설비의 아크 검출 알고리즘을 개발한다. 주파수 분석기반의 아크 검출을 위해서는 아크상태와 정상상태의 특성을 충분히 반영하는 필터를 설계하여야 한다. 아크 검출에 관련된 기존 연구에서는 아크를 검출하기 위하여 검출 주파수 범위를 100 kHz 이내로 설정하였다[10]. 또한, 100~1000 Hz 미만의 주파수는 입사 방사진동, 120 Hz 인버터 노이즈 및 60 Hz 계통 노이즈가 포함되어 있으므로, 이 주파수 대역은 아크 검출 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 태양광 아크 검출에는 1~100 kHz 사이의 주파수 특성을 이용하는 것이 바람직하다[11]. 대역통과필터 설계를 위하여 40~100 kHz의 주파수 범위를 사용[12], 또는 인버터 작동 주파수를 피하기 위하여 40~100 kHz의 주파수 범위를 고려한 연구가 있다[13]. 그러나 이러한 대역주파수 범위는 사용 환경에 따라 상이할 수 있으므로 명확하게 제시되고 있지는 않다. 따라서 본 논문에서는 다양한 필터구조에 따른 아크 성능을 분석하고, 연속된 주파수 정보의 크기 정보를 이용하여 아크를 검출하였다.

2. 태양광 발전 설비의 구성

오늘날 태양광 발전 설비에 사용되는 인버터는 소용량의 스트링 인버터와 대용량의 마이크로 인버터 두 가지 유형이 있다[14]. 스트링 인버터는 그림 1(a)와 같이 한 개의 큰 용량의 인버터에 모듈이 직렬로 연결되는 구조이다. 마이크로 인버터로 설치하였을 때 비교하여 초기 투자비용이 적은 장점이 있지만 한 개의 PV 모듈 출력이 전체 시스템 출력에 영향을 주는 단점이 있다. 스트링 인버터 구조에서 모듈 9%를 가리는 그림자가 생겼을 때 전체 시스템 출력이 54% 감소되고, 또한 냉각 팬을 함께 설치해야 하므로 팬에서 생기는 소음과 공간을 더 차지하는 단점이 있다. 따라서 스트링 인버터는 태양광 시스템에 그림자가 생기지 않는 환경에 설치하는 것이 바람직하다.

마이크로 인버터는 그림 1(b)와 같이 모듈 하나 또는 두 개에 작은 사이즈의 인버터를 연결하는 구조이다. 스트링 인버터에 비하여 전체 시스템 출력이 5~20% 증가하여, 열에 의한 손상을 입을 경우가 적고, 하나 또는 두 모듈에 문제가 있을 때 전체적인 출력에 영향이 미치지 않도록 조절할 수 있는 장점이 있다. 반면에 스트링 인버터로 설치할 때보다 약 30% 정도 높은 초기 투자비용이 드는 단점이 있다.

태양광 발전 설비에서 인버터 시스템은 태양광 패널에 의한 발생된 DC 전력을 가정에서 직접 활용하거나, 배터리 시스템에 저장하거나, 또는 전력계통으로 다시 보낼 수 있는 AC 전류로 변환한다. 일반적인 주거용 태양광 PV 설치에서는 개별 옥상 PV 모듈이 직렬로 연결된 후 스트링 인버터에 연결된다. 또한 인버터 내부의 최대 전력 추종 (MPPT : Maximum Power Point Tracking)은 가정용, 배터리 저장

또는 전력 계통에 연결된 PV 패널과 출력 간의 일치를 최적화한다.

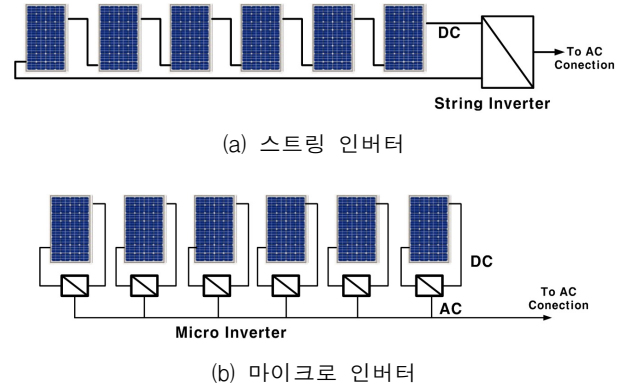


그림 1 인버터의 종류

Fig. 1 Type of inverter (a) String Inverter, (b) Micro inverter

인버터는 그림 2와 같이 태양광발전 시스템에서 매우 중요한 구성 요소이므로 태양광 발전용량, 설치위치, 계통연계형의 경우 전력계통의 특성 즉, 전압, 주파수, 용량 등을 검토하여야 한다. 인버터는 태양광 전지에서 생산된 직류전력을 교류전력으로 변환하는 기능 이외에 태양전지의 성능을 최대한으로 높이기 위한 기능, 고장 또는 이상 발생시 보호하는 기능도 갖추고 있다. 일기 변화에 따라 수시로 변동하는 태양광 전지의 출력을 최대한 높이기 위한 최대전력 추종제어, 자동운전 정지 기능, 전력계통과 연계되어 있을 경우 전력계통과의 전압을 일정하게 유지하기 위한 자동 전압조정기능, 전력계통 유지보수 시에 안전사고 예방을 위한 단독운전 방지기능을 갖추고 있다.

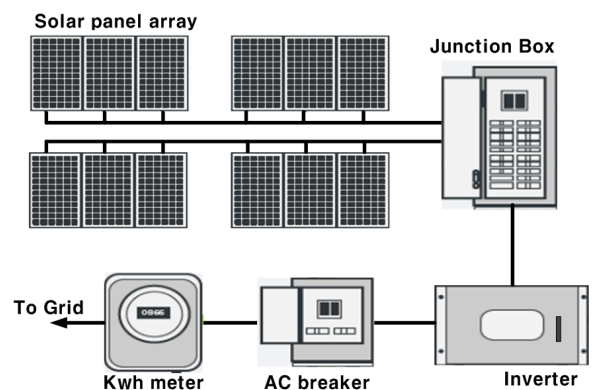


그림 2 계통 연계형 태양광 발전 시스템

Fig. 2 Grid-connected solar power generation system

3. 주파수 연속정보를 이용한 아크진단 알고리즘 개발

3.1 알고리즘 구성도

그림 3에서는 본 논문에서 제안한 아크 검출을 위한 구성도를 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 Pulse사의 전류 검출센서를 이용하여 전류를 검출한 후, 아크 특정 주파수

성분 검출을 위해 대역통과필터를 적용한다. 대역통과 필터링 된 신호를 이용하여 고속 푸리에 변환(DFT)을 실행한 후, 식 (1)에서 보는 바와 같이 특정 주기별로 주파수의 크기 성분인 에너지를 계산한다. 식 (1)에서 N 은 주파수 분석을 위해 사용된 샘플링 개수를 의미한다. 그 다음 단계로 식 (2)에서 보는 바와 같이 주기별로 계산된 각각의 에너지 값을 평균하여 최종 융합된 에너지 값을 계산하고 계산된 융합 에너지 값이 특정 임계값을 초과할 경우 아크로 진단한다.

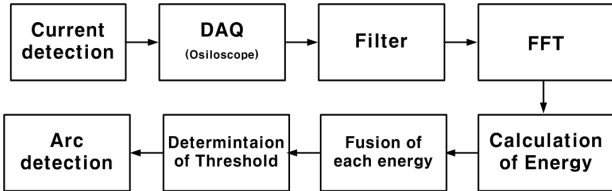


그림 3 아크 검출 구성도
Fig. 3 Configuration of arc detection

$$E_i = \sum_{k=0}^{N-1} |FFT(k)| \quad (1)$$

$$F_p = \sum_{i=1}^M E_i \quad (2)$$

3.2 실험장치 구성

본 논문에서는 공공기관 등에 널리 설치되어 있는 50 kW 태양광 발전설비에 대해 제안된 방법의 성능을 평가하였다. 그림 4에서는 50 kW 태양광 패널 설치 사진을 나타냈다. 태양광 모듈의 사양은 표 1에서 보는 바와 같이 정격출력 300 W, 정격전압 36.6 V, 정격전류 8.24 A의 사양을 갖는다.

표 1 태양광 모듈 사양

Table 1 Photovoltaic module specifications

Division	Specification	Division	Specification
Rated power	300 W	Efficiency	15.54 %
Rated voltage	36.4 V	Open voltage	45.8 V
Rated Current	8.24 A	Short current	8.65 A

그림 5에서는 아크 신호 분석을 위한 실험장치를 나타냈으며, 그림 6에서는 아크 신호를 검출하기 위하여 사용된 전류센서를 나타냈다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 아크 발생기는 UL 1699B 인증시험 기준에 의거하여 제작하였다. 태양광 모듈은 아크 발생기를 거쳐 인버터에 연결되고, 인버터는 계통에 연결되어 있다. 아크 출력신호는 오실로스코프(WaveSurfer 3024, sampling rate 4Gs/s)를 이용하여 센서 출력단의 전압을 측정하였다. 50 kW 태양광 발전설비는 병렬로 연결된 다수의 채널 중에서 임의로 선정된 1채널에 아크 검출 실험장치를 직렬로 연결하고 오실로스코프를 이용하여 데이터를 취득하였다. 표 2에서는 본 실험에 사용된 51kW 인버터 사양을 나타냈다.



그림 4 50 kW 태양광 패널 설치
Fig. 4 50 kW solar panel installation

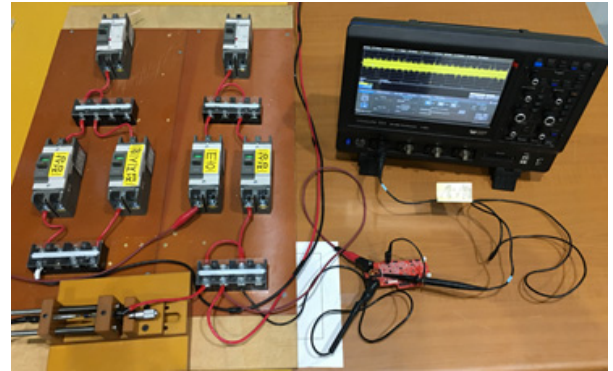


그림 5 직류 아크 실험장치 구성
Fig. 5 Configuration of DC arc experiment device



그림 6 전류 센서의 외형과 결선도
Fig. 6 Appearance and wiring diagram of current sensor

표 2 51 kW 인버터 사양

Table 2 51 kW inverter specifications

Division	Specification	Division	Specification
Operation	On-grid	Power factor	above 0.99
Input control	MPPT	Efficiency	96.26 %
Open voltage	DC 700 V	Input current	184 A
Range of input voltage	DC 260~700 V	Rated output voltage	380 AC
Rated Power	51 kW		

3.3 실험 결과

제안된 아크 검출 알고리즘의 성능 평가를 위하여 정상 상태에서 전류센서 출력과 아크 상태에서 전류센서 출력을 오실로스코프를 이용하여 취득하였다. 오실로스코프의 샘플링 주파수는 500 kHz로 설정하였고, 측정시마다 0.2초 동안

100,002개의 데이터를 취득하였다. 정상 및 아크 데이터는 일주일의 시간차를 두고 취득하였고, 하루 측정할 때마다 정상상태 20회, 아크상태 20회를 실험하였다.

고속푸리에 기반의 주파수 분석은 2^N 개의 데이터를 이용한다. 일반적으로 N 은 10을 설정하므로 본 논문에서도 1024개의 데이터를 이용하여 주파수 크기를 계산하였다. 1회 측정된 데이터는 100,002개의 데이터로 구성되어 있으므로 이를 1024개로 나누면 97개의 샘플을 얻을 수 있다. 정상상태 및 아크상태에서 각각 20번의 실험을 하였으므로, 실험에 사용된 샘플의 수는 정상데이터는 3880개(97/1회측정×20회×2일), 아크 데이터는 3880개로 각각 구성하여 아크 성능을 분석하였다.

표 3 및 그림 7에서는 필터 타입에 따른 아크검출 성능을 비교하여 나타냈다. 표 3 및 그림 7에서 보는 바와 같이 필터-1(대역통과 주파수 0~25 kHz), 필터-2(대역통과 주파수 25~50 kHz) 구조에서 다른 필터 구조에 비하여 우수하게 나타났다. 성능이 우수한 아크검출을 위해서는 주파수 분석 기법에 의해 계산된 단일 주파수 에너지 값을 이용하기 보다는 연속적인 주파수 에너지 값의 특성을 고려하는 것이 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 연속된 에너지 값의 평균을 고려하였을 때 아크 검출 성능을 비교 분석하였다.

표 4에서는 대역통과주파수 (0~25 kHz)를 갖는 필터-1에서 주파수 에너지 조합 개수에 따른 아크 검출 성능을 나타냈다. 표 4에서 성능평가 분석을 위해 인식률뿐만 아니라 정상상태의 에너지와 아크상태의 에너지 차별성을 의미하는 임계값 여유를 고려하였다. 임계값 여유를 계산하기 위하여 본 논문에서 식 (3)와 같이 정의하였다. 식 (3)에서 EA_{min} 는 아크 신호들 중에서 최소값을 갖는 에너지 값을 의미하고, EN_{max} 는 정상 신호들 중에서 최대값을 갖는 에너지 값을 의미한다. 따라서 EA_{min} 의 값이 EN_{max} 보다 클 경우 아크 검출율은 100[%]가 됨을 알 수 있다.

$$TM = \frac{EA_{min} - EN_{max}}{(EA_{min} + EN_{max})/2} \times 100 \quad (3)$$

표 4에서 보는 바와 같이 주파수 에너지 조합이 1개인 경우 아크 검출율은 99.21 %로 나타났으며, 임계값 여유 마진은 -29.04 %로 아크신호에 대한 에너지 값과 정상신호에 대한 에너지 값이 중첩되는 영역이 존재함을 알 수 있다. 주파수 에너지 조합의 개수가 증가할수록 아크 검출율은 향상됨을 알 수 있으며, 주파수 에너지 조합의 개수가 증가할수록 아크 검출율은 향상됨을 알 수 있으며, 조합의 개수가 4 이상일 때 검출성능은 100 %로 나타났다. 임계값 여유관점에서 조합의 개수가 15일 때 임계값 여유가 20.73 %로 나타나 어느 정도의 외란에도 검출이 가능함을 알 수 있다.

표 5에서는 대역통과주파수 (25~50 kHz)를 갖는 필터-2에서 주파수 에너지 조합 개수에 따른 아크 검출 성능을 나타냈다. 표 5에서 보는 바와 같이 주파수 에너지 조합이 1개인 경우 아크 검출율은 98.51 %로 나타났으며, 임계값 여유 마진은 -33.77 %로 아크신호에 대한 에너지 값과 정상신호에 대한 에너지 값이 중첩되는 영역이 존재함을 알 수 있다. 주파수 에너지 조합의 개수가 4인 경우와 6이상인 경우 검출성능은 100 %로 나타났다. 임계값 여유관점에서 조합의

표 3 필터 타입에 따른 아크 검출 성능

Table 3 Arc detection performance according to filter types

Filter	Band pass frequency(kHz)	Arc detection rate (%)	Threshold
Filter-1	0~25	99.21	0.0683
Filter-2	25~50	98.51	0.0262
Filter-3	50~75	85.44	0.0179
Filter-4	75~100	71.10	0.0194
Filter-5	100~125	58.91	0.0197
Filter-6	125~150	51.31	0.0231
Filter-7	150~175	50.22	0.0264
Filter-8	175~200	50.09	0.0303
Filter-9	200~225	50.25	0.0280
Filter-10	225~250	50.13	0.0288
Filter-11	50~100	81.91	0.0344
Filter-12	40~100	87.67	0.0413

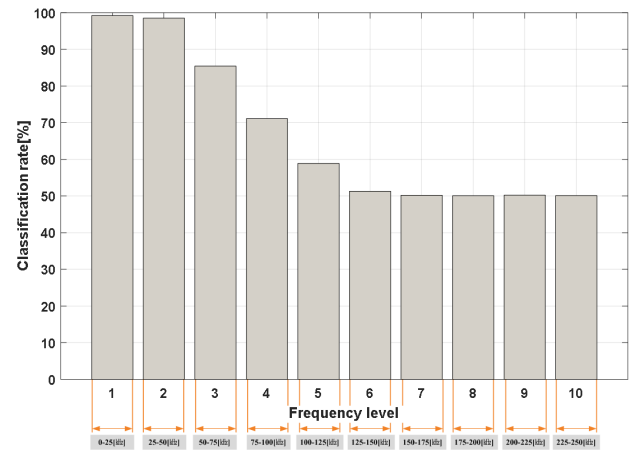


그림 7 필터 타입에 따른 아크 검출 성능

Fig. 7 Arc detection performance according to filter types

개수가 16일 때 임계값 여유가 32.77 %로 나타나 어느 정도의 외란에도 검출이 가능함을 알 수 있다.

표 4와 표 5를 비교하여 분석해 보았을 때 고려 대상의 50kw 태양광 발전설비의 아크 검출을 위해 대역통과 주파수 25~50 kHz인 필터 2가 인식률 및 임계값 여유 관점에서 우수함을 알 수 있다.

그림 8에서는 정상과 아크신호가 포함된 샘플의 아크 검출 성능을 나타냈다. 대역통과필터는 25~50 kHz인 필터 2를 적용하였다. 그림 8의 상단 파형은 초기 정상상태이었다가 아크상태로 변화를 주어 취득한 데이터의 파형을 의미한다. 또한, 그림 8의 하단 파형은 1024개의 샘플을 이용하여 주파수 에너지를 구하고, 계산된 주파수 에너지 5개의 평균을 나타냈다. 그림 8에서 보는 바와 같이 정상상태에서의 주파수 에너지는 임계값은 0.1148 이하로 나타나 모두 정상으로 판정되었다. 아크가 발생한 시점에서는 주파수 에너지가 임계값인 0.1148 이상으로 나타나 아크상태임을 정확하게 검출함을 확인할 수 있다.

표 4 에너지 조합에 따른 아크 검출 성능 (0~25 kHz)

Table 4 Arc detection performance according to combination number of frequency energy (0~25 kHz)

Number	Arc detection rate (%)	Frequency energy		Threshold margin (%)
		Maximum value of normal signal	Minimum value of arc signal	
1	99.21	0.0730	0.0545	-29.04
2	99.72	0.1312	0.1198	-9.10
3	99.88	0.1951	0.1848	-5.40
4	100.00	0.2439	0.2504	2.62
5	100.00	0.2982	0.3238	8.23
6	100.00	0.3581	0.3816	6.37
7	100.00	0.4219	0.4619	9.07
8	100.00	0.4713	0.5212	10.05
9	100.00	0.5261	0.6114	15.00
10	100.00	0.5758	0.6524	12.48
11	100.00	0.6516	0.7417	12.93
12	100.00	0.6868	0.8114	16.63
13	100.00	0.7362	0.8981	19.82
14	100.00	0.7933	0.9577	18.77
15	100.00	0.8542	1.0517	20.73
16	100.00	0.9156	1.0822	16.67
17	100.00	0.9498	1.1513	19.19
18	100.00	0.9986	1.2244	20.31
19	100.00	1.0651	1.2789	18.24
20	100.00	1.1135	1.3540	19.49

표 5 에너지 조합에 따른 아크 검출 성능 (25~50 kHz)

Table 5 Arc detection performance according to combination number of frequency energy (25~50 kHz)

Number	Arc detection rate (%)	Frequency energy		Threshold margin (%)
		Maximum value of normal signal	Minimum value of arc signal	
1	98.51	0.0293	0.0208	-33.77
2	99.77	0.0504	0.0464	-8.38
3	99.92	0.0739	0.0690	-6.93
4	100.0	0.0916	0.0982	7.02
5	99.94	0.1123	0.1173	4.33
6	100.0	0.1340	0.1584	16.71
7	100.0	0.1536	0.1798	15.73
8	100.0	0.1741	0.2162	21.55
9	100.0	0.1957	0.2484	23.72
10	100.0	0.2165	0.2764	24.31
11	100.0	0.2336	0.3181	30.64
12	100.0	0.2541	0.3409	29.17
13	100.0	0.2738	0.3648	28.49
14	100.0	0.2965	0.3949	28.47
15	100.0	0.3171	0.4312	30.51
16	100.0	0.3371	0.4692	32.77
17	100.0	0.3609	0.4904	30.42
18	100.0	0.3798	0.5310	33.20
19	100.0	0.4016	0.5554	32.14
20	100.0	0.4207	0.5851	32.69

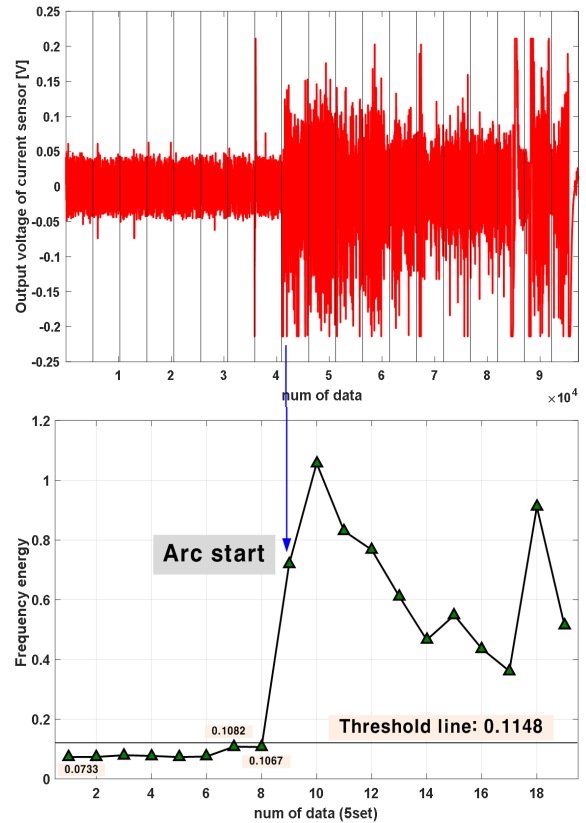


그림 8 정상과 아크 신호에 대한 검출 성능

Fig. 8 Arc detection performance of samples with normal and arc signals

4. 결 론

태양광 발전설비의 아크 검출은 주파수 분석기법을 기반으로 알고리즘이 개발되고 있다. 그러나 주파수 스펙트럼을 이용하였을 때 아크가 있는 경우와 없는 경우의 주파수 스펙트럼이 인버터, 환경, 작동 조건 등에 따라 변하기 때문에 고려 대상인 특정 태양광 발전설비에 한정되어 설정이 이루어져야한다는 단점이 있다.

본 논문에서 주파수 분석을 통하여 50kW 태양광 발전설비에 대해 아크 검출성능을 분석한 결과, 대역통과 주파수 0~25 kHz와 25~50 kHz 구조에서 다른 필터 구조에 비하여 우수하게 나타났다. 또한 아크 검출의 성능을 향상시키기 위하여 연속된 주파수 에너지 값의 평균을 이용한 아크 검출 알고리즘을 제안하였다. 실험결과 대역통과주파수 25~50 kHz를 적용한 경우 주파수 에너지 조합의 증가에 따라 아크 검출성능이 가장 우수하였다. 향후 다양한 태양광 설비에 대해 대역통과주파수의 특성을 분석한 후, 임베디드 타입의 소형 아크 검출기를 개발하고자 한다.

References

[1] National Electric Code(NFPA 70), National Fire Protection Association, 2011.
 [2] Underwriters Laboratories, "Outline of investigation

for Photovoltaic (PV) DC arc-fault circuit protection,” UL1699B, 2011.

- [3] M. K. Alam, F. Khan, J. Johnson, and J. Flicker, “A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: Types, detection, and mitigation techniques,” *IEEE Journal, Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 982–997, 2015.
- [4] C. E. Restrepo, “Arc fault detection and discrimination methods,” *Contacts Conf.*, pp. 115–12, 2007.
- [5] J. Johnson, B. Pahl, C. Luebke, T. Pier, T. Miller, J. Strauch, S. Kuszmaul, and W. Bower, “Photovoltaic DC arc fault detector testing at Sandia National Laboratories,” *IEEE Photovoltaic Special Conf.*, pp. 3614–3619, 2011
- [6] J. Johnson, S. Kuszmaul, W. Bower, and D. Schoenwald, “Using PV module and line frequency response data to create robust arc fault detectors,” *Photovoltaic Sol. Energy Conf.*, pp. 3745–3750, 2011
- [7] B. Novak, “Implementing arc detection in solar applications: Achieving compliance with the new UL 1699B standard,” *Texas Instruments*, Dallas, TX, US.
- [8] Sang-Kyu Kim, Pyeong-Shik Ji, “Arc Detection Method of Photovoltaic System using Frequency Analysis,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 66P, no. 3, pp. 144–149, 2017.
- [9] F. Reil, A. Sepanski, S. Raubach, M. Vosen, and E. Dietrich, “Comparison of different DC arc spectra: Derivation of proposals for the development of an international arc fault detector standard,” *IEEE Photovoltaic Special Conf.*, pp. 1589–1593, 2013.
- [10] Johnson J, Kuszmaul S, Bower W, Schoenwald D, “Using PV module and line frequency response data to create robust arc fault detectors,” *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 3745–3750, 2011.
- [11] Yuan Gao, Jianfei Dong, Yaojie Sun, Yandan Lin, Rui Zhang, “PV arc-fault feature extraction and detection based on bayesian support vector machines,” *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 283–290, 2015.
- [12] Novak B, “Implementing arc detection in solar applications: achieving compliance with the new UL 1699B Standard,” *Texas Instruments*, 2012.
- [13] G. S. Seo, H. Bae, B. H. Cho, and K. C. Lee, “Arc protection scheme for DC distribution systems with photovoltaic generation,” *Conf. Renewable Energy*, pp. 1–5, 2012
- [14] J. Johnson, M. Montoya, S. McCalmont, G. Katzir, F. Fuks, J. Earle, A. Fresquez, S. Gonzalez, and J. Granata, “Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults,” *Photovoltaic Special Conf.*, 2012.

저 자 소 개



김 상 규 (Sang-Kyu Kim)

2000년 한국교통대학교 전기공학과 졸업 (공학사), 2014년 2월 동 대학교 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2018년 2월 동 대학원 박사과정 졸업(박사), 건축전기설비기술사, 현재 (주)케이피엔안전진단기술원 대표이사

E-mail : space6922@hanmail.net



이 창 성 (Chang-Sung Lee)

2011년 한국교통대학교 전기공학과 석사과정 졸업(석사), 2016년 동대학원 박사과정 졸업(박사), 발송배전기술사, 현재 (주)세명이앤씨 전무이사

E-mail : csd66@empas.com



지 평 식 (Pyeong-Shik Ji)

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

E-mail : psji@ut.ac.kr