

# 대용량 PV 시스템 적용을 위한 DWT 알고리즘 기반 태양광 직렬 아크 검출기

조찬기, 안재범, 이진한, 류홍제  
 중앙대학교

## DC Series Arc Fault Detector Based on the Discrete Wavelet Transform Algorithm for a Large Photovoltaic System

Chan-Gi Cho, Jae-Beom Ahn, Jin-Han Lee, Hong-Je Ryoo  
 Chung-Ang University

### ABSTRACT

본 논문은 주파수 분석 방법 중 하나인 Discrete Wavelet Transform (DWT)을 활용하여 태양광 직렬 아크 사고를 검출하는 방법에 관하여 다룬다. DWT 알고리즘은 주파수 도메인에서도 시간 축 정보를 표현할 수 있어 기존의 Fast Fourier Transform (FFT) 주파수 분석 알고리즘과 차이점이 있으며, 대용량 태양광 시스템의 직렬 아크 사고 검출에 최적화 되도록 DWT 알고리즘의 속도를 향상시켜 태양광 DC 아크 사고 안전 규격인 UL1699B의 요구 조건을 만족시켰다. DWT 알고리즘의 경우 TMS320F28033 기반으로 구현 되었으며 대용량 PV 시스템 적용을 위해 로고스키코일을 전류 센서로 사용하였다. 또한, 모의 DC 직렬 아크 발생 회로를 구축하여 제작한 사고 검출기의 성능을 실제 아크 발생 조건에서 검증하였다.

### 1. 서 론

태양광 시스템에서의 DC 직렬 아크 사고는 잠재적 화재 위험 요인이다. 태양광 발전 시스템은 무수히 많은 커패터와 케이블로 구현되어있고, 발전 시스템의 오랜 구동에 따라 사용된 부품들은 햇빛에 의한 노화, 야생동물들로 인한 손상 등의 이유로 절연 내력이 감소하고 결선이 느슨해져 DC 직렬 아크 사고를 야기한다 [1-2]. 태양광 발전 시스템은 화재사고로부터 인명과 재산 피해를 예방하기 위해 DC 직렬 아크 사고의 발생을 검지 및 소호 시켜야하며 동작 안전 지침: UL1699B를 만족해야한다 [3].

효과적인 DC 직렬 아크 사고 검출을 위해서는 교류 발전 시스템과는 다른 검출 방법이 요구된다. 교류 발전 시스템의 경우 통전 전압과 전류가 일정한 주기를 갖고 0의 값을 지나기 때문에 아크 발생 시의 전압 혹은 전류의 순시적인 정보로부터 아크를 검출할 수 있다. 그러나, 태양광 발전과 같은 직류 발전 시스템의 경우에는 통전 전압과 전류가 0의 값을 지나지 않기 때문에 아크 발생을 순시적으로 분석하기 어렵고 그에 따라 아크의 주파수 정보를 분석하여 직류 발전 시스템의 아크 사고를 검출한다.

본 논문에서는 TMS320F28033 digital signal processor (DSP)를 기반으로하는 DC 직렬 아크 사고 검출기를 설계 및 제작하고, 수행한 fast Fourier transform (FFT)와 discrete wavelet transform (DWT) 주파수 분석 방법의 결과를 비교 분석하여 아크 사고 검출을 물리적으로 구현할 뿐만아니라

DWT 계산 시간을 단축시키는 알고리즘을 제안한다.

### 2. 태양광 직렬 아크 사고 검출 시스템 설계 및 직렬 아크의 주파수 특성 분석

태양광 시스템의 DC 직렬 아크 사고는 그림 1과 같은 시스템을 설계 및 구현하여 모의된다. 단상 입력 전원 (V1)을 정류하여 커패시터 뱅크 (C1)에 300 V의 전압을 생성하고, 전류 제한 저항 (R1)으로 아크 발생 시의 도통 전류를 조절하며 턴-온과 턴-오프 상태가 수동으로 조절되는 스위치 (SW1)를 이용해 모의 아크를 발생시킨다. DC 직렬 아크는 도통 전류에 고주파수 성분으로 계측되며 아크 사고 검출기는 로고스키코일로 도통 전류의 아크 정보를 입력 받는다. 입력된 DC 직렬 아크 전류의 고주파수 성분은 16 bit, 238 kHz의 analog to digital conversion (ADC)이 수행되고 FFT 혹은 DWT로 분석되어 아크 사고 발생의 판단을 돕는다. 아크 사고가 발생한 것으로 판단되면 사용자에게 아크 발생을 시각적으로 알리기 위해 LED가 점멸된다. 구현된 시스템의 사진은 그림 2이고, 300 V 3 A의 DC 직렬 아크 사고 발생 측정 파형은 그림 3과 같다.

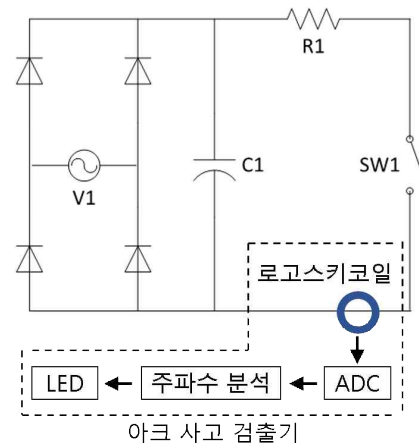


그림 1 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출 모의 회로도와 아크 사고 검출기 구성의 블록도

Fig. 1 Circuit of a photovoltaic DC series arc fault detection and block diagram of an arc fault detector



그림 2 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출 시스템 사진  
Fig. 2 Picture of a photovoltaic DC series arc fault detection system

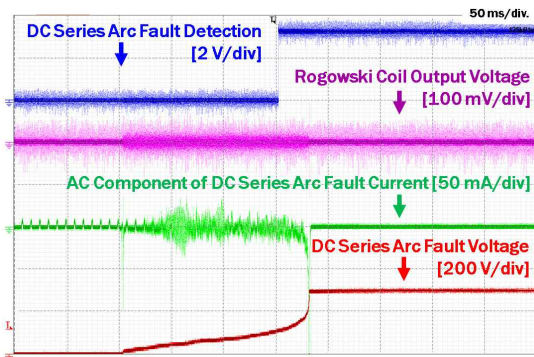


그림 3 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출 측정 파형  
Fig. 3 Experimental waveform of a photovoltaic DC series arc fault detection

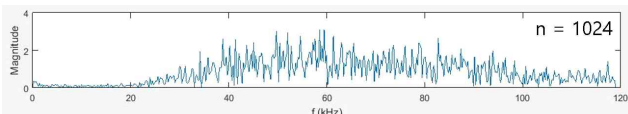


그림 4 태양광 DC 직렬 아크 사고의 FFT 결과  
Fig. 4 FFT result of a photovoltaic DC series arc fault detection

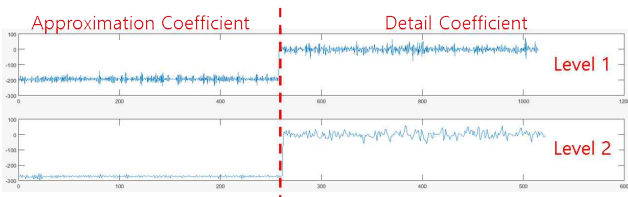


그림 5 태양광 DC 직렬 아크 사고의 DWT 결과  
Fig. 5 DWT result of a photovoltaic DC series arc fault detection

SW1을 턴-오프 시킴에 따라 DC 직렬 아크가 발생하고 그림 3의 DC 직렬 아크 사고 전압은 서서히 상승한다. 동시에 DC 직렬 아크 사고 전류는 3 A에서 0 A로 감소하기 시작하며, 측정된 전류의 AC 성분을 보면 아크 발생에 따라 고주파수의 전류 성분이 발생한 것을 알 수 있다. 발생한 주파수 성분은 로 고스키 코일을 통해 DSP로 입력된 후 주파수 분석 결과를 DC 직렬 아크 사고를 판단한다.

## 2.1 Fast Fourier Transform 적용 주파수 특성 분석

ADC된 시간 도메인의 DC 직렬 아크 사고 전류는 수식(1)에 따라 주파수 도메인으로 변환되고 [4], 그 결과는 그림 4로 나타내었다.

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

$X(k)$ 는 주파수 도메인의 샘플,  $x(n)$ 은 시간 도메인의 샘플,  $N$ 은 ADC 샘플수를 의미한다.

FFT 분석 결과 0 ~ 20 kHz의 주파수 성분의 크기는 0에 가깝고, 30 ~ 100 kHz의 주파수 성분의 크기는 1 ~ 3 사이의 값을 갖는다. 따라서, FFT 수행의 경우 30 kHz 이상의 주파수 성분이 존재한다면 DC 직렬 아크 사고 발생이라 판단할 수 있지만, 아크 사고 발생 유무의 판단 기준 값을 어떻게 설정하느냐에 따라 아크 사고 검출기의 성능이 크게 좌우된다.

실제 태양광 시스템은 MPPT 알고리즘에 따른 부스트 컨버터의 스위칭 노이즈와 계통 연계를 위한 인버터의 스위칭 노이즈가 존재하고, 태양광 발전 시스템의 발전 용량 및 컨버터들의 소자 특성에 따라 일반적으로 50 kHz 미만의 스위칭 주파수가 사용되고 있다. 그 결과 DC 직렬 아크 사고의 주파수 범위와 태양광 발전 시스템의 동작 스위칭 노이즈 범위가 중복되기 때문에 이를 구분하는 기술이 요구된다.

## 2.2 Discrete Wavelet Transform 적용 주파수 특성 분석

원리적으로 웨이블릿 변환은 기저함수를 수축(contraction) 및 팽창(expansion), 그리고 변형(translation) 하여 입력 신호를 분석하게 되고, 웨이블릿 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform)을 표현하면 다음과 같다.

$$Y(s, \tau) = \int f(t)\psi_{s, \tau}^*(t)dt \quad (2)$$

$f(t)$ 는 입력 신호,  $\Psi(t)$ 는 기저 함수 또는 웨이블릿 함수, \*는 기저 함수의 켈레 복소수를 의미한다.

실제 웨이블릿 변환의 구현은 연속 신호가 아닌 샘플링 된 신호를 사용하므로 DWT: 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)이 이루어지게 된다. 따라서, 기저함수는 다음의 수식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\psi_{j, k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{t - kb}{a^j}\right) \quad (3)$$

$j$ 는 scale,  $k$ 는 translation을 의미하고, 일반적으로  $a = 2$ ,  $b = 1$ 로 수행되어,  $j$ 는 기저 함수를 수축 및 팽창시키고  $k$ 는 기저 함수를 이동시킨다 [5].

DWT도 FFT와 유사하게 입력 신호의 주파수 성분을 표현하지만, FFT의 경우 무수히 많은 주파수의 사인함수의 합으로 입력 신호를 나타내고 DWT의 경우 사인함수가 아닌 다양한 모양의 기저함수로 입력 신호를 나타낸다. DWT에 사용 되는 대표적인 기저 함수들은 Haar, Daubechies 등이 있다.

본 논문에서는 Daubechies 4를 기저 함수로 활용하여 DC 직렬 아크 사고 신호를 분석하였고 그 결과는 그림 5와 같다. 입력 신호는 DWT를 거쳐 approximation coefficient와 detail coefficient의 결과를 얻는다. 레벨1의 detail coefficient는 입력 신호인 DC 직렬 아크 사고 신호에 59 kHz ~ 119 kHz의 주파수 특성을 나타내고, 레벨2의 detail coefficient는 29 kHz ~ 59 kHz의 주파수 특성을 나타낸다. 따라서, FFT 분석과 동일한 DC 직렬 아크 사고의 주파수 영역이 검출 되었으며 이를 활용

하여 개발된 DC 직렬 아크 사고 검출기는 아크를 판단한다. 나아가, 오검출을 최소화하기 위해서 아크 발생 판단 기준 전압을 설치한 발전 시스템의 스위칭 노이즈에 따라 조절할 수 있도록 설계 및 구현되었다.

### 3. 태양광 직렬 아크 사고 검출을 위한 변형된 Discrete Wavelet Transform 알고리즘

2장의 DC 직렬 아크 사고 검출 과정을 간단히 요약하면 측정된 아크 사고의 주파수 정보를 FFT 혹은 DWT 수행 후 30 kHz ~ 100 kHz 주파수 영역의 크기가 아크 사고 판단 기준값을 초과하면 아크 사고로 검출한다. 그 중 DWT는 multiresolution analysis 방법으로 설계 및 구현되었고, 제시하는 그림 6의 방법으로 대용량 태양광 직렬 아크 사고 검출을 위해 DWT 알고리즘을 수정하여 기존의 수행 시간인 42 ms를 13 ms로 약 70 % 단축시켰다.

ADC 결과 N개의 입력 신호 샘플수 ( $N = 2$ 의 제곱근)를 획득한다면, 레벨1의 DWT 변환이 수행되는데  $4N$ 번의 곱셈과  $N$ 번의 덧셈이 연산이 필요하다. 나아가 마지막 레벨까지 multiresolution analysis의 DWT 변환을 수행하면 약  $8N$ 번의 곱셈연산이 소요된다.

그러나, 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출에서는 특정 주파수 영역의 detail coefficient만 필요하기 때문에 입력 신호의 모든 샘플들의 DWT를 수행하지 않아도 아크 사고 검출을 위한 주파수 정보를 연산해낼 수 있다. 이는 DWT 결과가 주파수 정보와 시간 정보를 동시에 표현하기 때문에 적용 가능한 방법으로 FFT 연산과정과는 차이가 있다. 예를 들어, 레벨2의 29 kHz ~ 59 kHz detail coefficient 주파수 특성을 DC 직렬 아크 사고 발생 유무 판단에 활용한다면, DWT 결과에는 시간축도 같이 표현이 되기 때문에 아크의 해당 주파수 특성은 레벨2 detail coefficient 전범위에 걸쳐 측정되므로 그 중  $n$ 개의 샘플수만으로 아크 사고 발생 유무를 판단할 수 있다. 레벨2의 detail coefficient에서  $n$ 개의 샘플수를 연산하기 위해서 레벨1과 입력 신호에 요구되는 샘플수는 그림6과 같이 각각  $2n+2$ 개,  $2(2n+2)+2$ 개이다. 결과적으로 입력 신호  $N$ 개를 DWT 수행하는 것이 아니라, 입력 신호 중  $4n+6$ 개만을 DWT 수행하게 되어 효과적으로 DWT 연산 시간을 단축시킨다. 아크 사고 판단을 위한 레벨2의  $n$ 개 샘플수가 적을수록 DWT 연산 시간은 단축되지만, 아크 사고 판단의 정확도와 트레이드-오프 관계가 있으며 실험적으로 16개의 레벨2 detail coefficient 로 아크 사고 판단이 구현되는 것을 확인하였다.

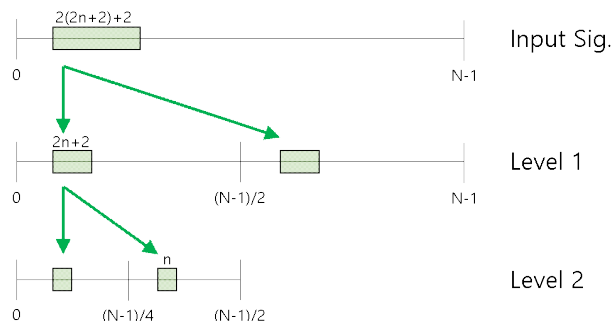


그림 6 변형된 DWT 알고리즘 동작 개념도  
Fig. 6 Modified DWT algorithm operation diagram

### 4. 결론

본 논문은 대용량 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출기에 적용되는 discrete wavelet transform (DWT) 주파수 분석 방법의 연산시간을 단축한 알고리즘을 제시한다. 주파수 분석 방법의 경우 널리 사용되고 있는 FFT 방법과 새롭게 적용 및 연구되고 있는 DWT 방법을 각각 구현하여 측정된 DC 직렬 아크의 주파수 성분을 분석 및 비교하였다. 그 결과 두 가지 주파수 분석 방법 모두 30 kHz ~ 100 kHz의 주파수 성분이 DC 직렬 아크 사고 발생 시 관측됨을 확인하였으며, 측정된 영역의 주파수 범위를 분석하여 아크 사고 발생 유무의 판단이 가능했다. 나아가 아크 사고 검출을 확인하는 것뿐만 아니라, DWT 알고리즘의 DC 직렬 아크 사고 발생 유무 판단 시 ADC된 모든 샘플수에 DWT를 수행하지 않고 detail coefficient의 레벨과 샘플수를 선택적으로 고려하는 DWT 알고리즘을 제안하여 주파수 분석 연산 시간을 기존의 42 ms에서 13 ms 까지 효과적으로 단축시켰다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20192910100090)

### 참고 문헌

- [1] Qing Xionga, Shengchang Jia, Xiaojun Liua, Xianyong Fengb, Fan Zhanga, Lingyu Zhua, Angelo L. Gattozzib, and Robert E. Hebnerb, "Detecting and localizing series arc fault in photovoltaic systems based on time and frequency characteristics of capacitor current", Solar Energy, vol. 170, pp. 788 - 799, Aug. 2018.
- [2] Zhan Wang, Stephen McConnell, Robert S. Balog and Jay Johnson, "Arc Fault Signal Detection - Fourier Transformation vs. Wavelet Decomposition Techniques using Synthesized Data", in 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, 2014, pp. 1 - 6.
- [3] Underwriters Laboratories 1699B, "Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection, 1st ed., 2 Aug. 2018.
- [4] S. Rapuano and F. Harris, "An introduction to FFT and time domain windows," Instrumentation and Measurement, pp. 32 - 44, Dec. 2007, Part 11 in a series of tutorials.
- [5] 조찬기, 유창어, 류홍제, 김용주, "태양광 발전시스템의 DC 아크 검출을 위한 DWT 알고리즘", 한국조명·전기설비학회 2019 추계학술대회 논문집, 2019.11, pp. 13-13.