

태양광 직렬 아크 검출기의 검출 성능 및 DWT 알고리즘 연산 속도 개선

조찬기¹, 안재범², 이진한², 이기덕³, 이진³, 류홍제[†]

Arc Detection Performance and Processing Speed Improvement of Discrete Wavelet Transform Algorithm for Photovoltaic Series Arc Fault Detector

Chan-Gi Cho¹, Jae-Beom Ahn², Jin-Han Lee², Ki-Duk Lee³, Jin Lee³, and Hong-Jae Ryoo[†]

Abstract

This study proposes a DC series arc fault detector using a frequency analysis method called the discrete wavelet transform (DWT), in which the processing speed of the DWT algorithm is improved effectively. The processing time can be shortened because of the time characteristic of the DWT result. The performance of the developed DC series arc fault detector for a large photovoltaic system is verified with various DC series arc generation conditions. Successful DC series arc detection and improved calculation time were both demonstrated through the measured actual arc experimental result.

Key words: Photovoltaic system, DC series arc fault, DWT (Discrete Wavelet Transform), FFT (Fast Fourier Transform), AFD (Arc Fault Detector)

1. 서 론

태양광 발전 시스템은 무수히 많은 커넥터와 케이블로 구현되어 있고 실외에 노출되어 있는 경우가 많다. 이에 따라 사용된 부품들의 햇빛에 의한 노화와 야생동물들로 인한 소손 등의 이유로 절연 내력 감소와 결선 불량 발생하고, 잠재적 화재 위험 요인인 DC 직렬 아크 사고가 야기될 수 있다^{[1],[2]}. 태양광 시스템에서 발생한 DC 직렬 아크 사고는 그림 1과 같다. 이러한 아크의 화재사고로부터 인명과 재산 피해를 보호하기 위해 태양광 발전 시스템은 아크 검출에 대한 안전 규격을 만족해야 한다.

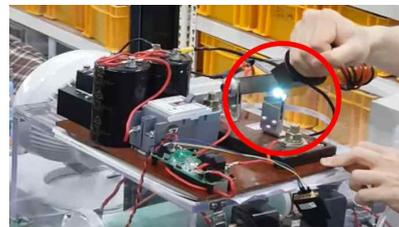


Fig. 1. Picture of simulated DC series arc fault.

아크 발생 및 사고를 예방하기 위해 2011년도에 National Electrical Code(NEC)에서는 80V 이상의 전압을 이용하는 모든 태양광 발전 시스템에 아크 보호 기능의 필요성을 언급하였고, 2012년에는 Underwriters Laboratories, Inc.(UL) 태양광 발전 시스템의 아크 보호 장치 안전 규격: UL1699B^[3]가 제시되었다.

효과적인 DC 직렬 아크 사고 검출을 위해서는 AC 발전 시스템과는 다른 검출 방법이 요구된다. AC 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 DC 발전 시스템의 경우에는 통전 전압과 전류가 0의 값을 지나지 않기 때문에 아크 발생을 순시적인 전압 혹은 전류의 변화로 분석하는 데에

Paper number: TKPE-2021-26-1-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hjryoo@cau.ac.kr, Dept. of Energy Systems Eng., Chung-Ang University
Tel: +82-2-820-5178 Fax: +82-2-3280-5867

¹ Laser Weapon Systems PMO, Agency for Defense Development

² Dept. of Energy Systems Eng., Chung-Ang University

³ Research & Development Center, O & M KOREA

Manuscript received Sep. 15, 2020; revised Oct. 7, 2020; accepted Oct. 26, 2020

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

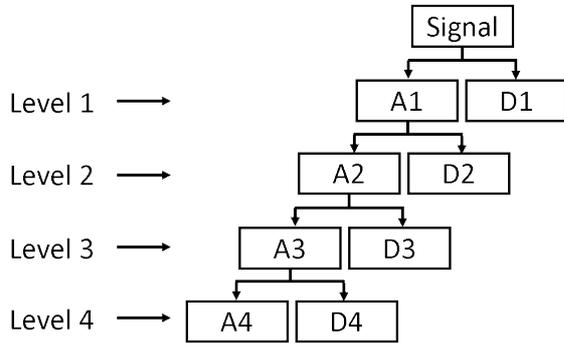


Fig. 2. Multi-resolution signal decomposition result of discrete wavelet transform.

어려움이 있다. 이에 따라 DC 발전 시스템에서는 발생한 아크의 주파수 정보를 분석하여 아크 사고를 검출하는 연구가 수행되고 있다.

아크의 주파수 정보를 분석하는 방법으로 Fast fourier transform(FFT) 분석을 활용해 태양광 직렬 아크 사고 발생을 판단하는 아크 검출 방법이 개발되었으나^{[4],[5]}, FFT 주파수 분석 방법의 경우 변환 결과에 시간 성분이 표현되지 못하는 한계가 있다. 이와 대조적으로 discrete wavelet transform(DWT) 분석은 변환 결과에 주파수 성분과 시간 성분을 동시에 표현 가능하고, mother wavelet의 종류를 선택적으로 사용할 수 있어 아크와 같은 고주파수의 노이즈 신호를 분석하기 용이하기 때문에^[6] DWT 분석을 사용하는 태양광 직렬 아크 검출 연구가 수행되고 있다^{[7]-[9]}.

본 논문에서는 TMS320F28033 digital signal processor (DSP)를 기반으로 하는 DC 직렬 아크 사고 검출 실시간 알고리즘을 개발하고 DWT 주파수 변환 결과를 분석하여 아크 사고 검출기를 물리적으로 구현함에 있어, 기존 DWT 알고리즘 연산 시간의 20%로 연산 속도를 개선하고 UL1699B 안전 지침인 2.5초와 아크 에너지 750J 이내에 발생한 아크를 소호하는 태양광 직렬 아크 사고 검출 방법을 제안한다.

논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서 웨이블릿 변환의 정의와 구현 방법을 논의하고 제안하는 DWT 연산 속도 향상 알고리즘의 원리를 분석한다. 그 후 3장에서는 태양광 발전 시스템의 모의 아크 발생을 구현하여 개발한 아크 검출 알고리즘과 아크 검출기의 성능을 검증하고, 결론으로 실험 내용들과 제안된 알고리즘의 특징을 정리하여 기술한다.

2. Discrete Wavelet Transform 직렬 아크 사고 검출 알고리즘

본 장에서는 사용된 DWT 분석의 변환 원리와 아크 사고 검출 알고리즘의 단계별 특징을 설명하고, 아크 사고 검출 알고리즘의 연산 속도 개선 과정을 제시한다.

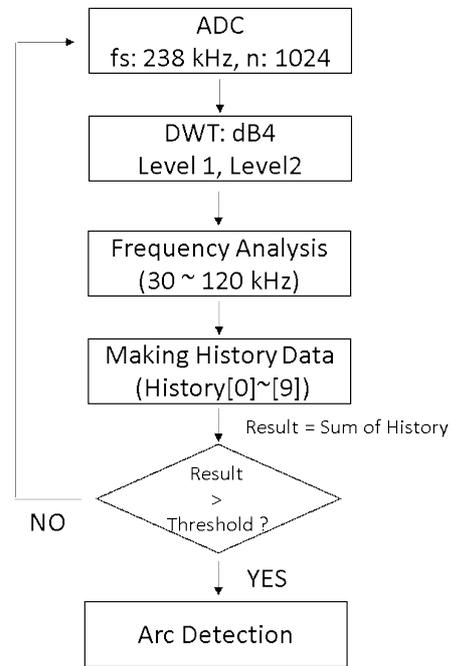


Fig. 3. Arc detection algorithm flow chart.

2.1 Wavelet transform

웨이블릿 변환은 기저함수를 수축(Contraction) 및 팽창(Expansion), 그리고 변형(Translation) 하여 입력 신호를 분석하게 되고, 연속 웨이블릿 변환(Continuous wavelet transform)을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s, \tau}^*(t) dt \quad (1)$$

$f(t)$ 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, 이산 웨이블릿 변환과 기저함수는 다음의 수식들과 같이 표현된다.

$$Y(s, \tau) = \sum_{n \in Z} f(n) \psi_{s, \tau}^*(n) \quad (2)$$

$$\psi_{s, \tau}(n) = \frac{1}{\sqrt{a^s}} \psi\left(\frac{n - \tau b}{a^s}\right) \quad (3)$$

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

DWT에 사용되는 대표적인 기저 함수들은 Haar, Daubechies 등이 있으며, 본 논문에서는 Daubechies 4를 기저 함수로 활용하였다. DWT 결과값 도출에 있어 level에 따라 다양한 주파수와 시간 해상도를 제공하는

multi-resolution signal decomposition(MSD) 기법을 적용하여 그림 2와 같이 approximation coefficient(A1~A4)와 detail coefficient(D1~D4)로 구성되는 DWT 결과를 얻는다. Approximation coefficient는 원신호의 low-pass filter를 통과한 결과와 같고 detail coefficient는 원신호의 high-pass filter를 통과한 결과와 같다.

2.2 Discrete wavelet transform 기반 직렬 아크 사고 검출 알고리즘

로고스키 전류센서를 이용해 태양광 시스템의 도통 전류 정보를 238kSPS의 속도로 1024개의 analog to digital conversion(ADC)을 수행하여 raw data를 획득하게 되며, 이는 그림 3 아크 검출 알고리즘의 첫 번째 단계이다. ADC 결과는 DC 성분이 먼저 제거된 후 DWT를 수행하여 1개의 approximation coefficient와 2개의 detail coefficient 결과를 얻는다. Level 1 detail coefficient 결과는 raw data의 60~120kHz 주파수 정보를 의미하고, level 2 detail coefficient 결과는 30~60kHz 주파수 정보를 의미한다. 30~120kHz의 주파수 범위는 직렬 아크 사고의 주요한 주파수 성분 범위이기 때문에 DWT 결과에서 해당 주파수 정보를 획득할 수 있도록 알고리즘을 수행하였다. 2개의 detail coefficient 결과를 시간 축에 대하여 적분한 결과를 하나의 history로 저장한다. 저장된 결과는 앞서 설명된 알고리즘을 반복하여 10개의 history 값이 도출되고, 최종적으로 사용자가 선정한 threshold 값과 비교하여 아크 발생 유무를 판단한다. DWT level 2 연산의 결과로 Level 2 approximation coefficient 결과도 같이 도출되지만, 0~30kHz의 주파수 성분을 의미하기 때문에 아크 검출 알고리즘에 사용하지 않았다.

2.3 Discrete wavelet transform 연산 속도 향상 방법

ADC 결과 N개의 입력 신호 샘플수(N=2의 제곱근)를 획득한다면, level 1의 DWT 변환이 수행되는데 4N번의 곱셈과 N번의 덧셈 연산이 요구된다. 2 level까지 multiresolution analysis의 DWT 변환을 수행하면 약 8N번의 곱셈연산이 소요된다.

그러나, DWT 결과는 주파수 정보뿐만 아니라 시간 축 성분을 포함하고 있기 때문에 level 1과 level 2의 모든 샘플 수에 대하여 DWT를 수행하지 않아도 직렬 아크 사고 검출이 가능하다. 예를 들어, level 2의 30kHz~60kHz detail coefficient 주파수 특성을 DC 직렬 아크 사고 발생 유무 판단에 활용한다면, DWT 결과에는 시간축 정보가 같이 표현되어 있기 때문에 발생한 아크의 주파수 특성은 레벨2 detail coefficient 전범위에 걸쳐 측정되므로 그중 일부인 n개의 샘플 수만으로도 아크 사고 발생 유무를 판단할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 DWT 연산 속도를 개선하기 위한 방법으로 아크 사고 판단에 사용하는 주파수 분석

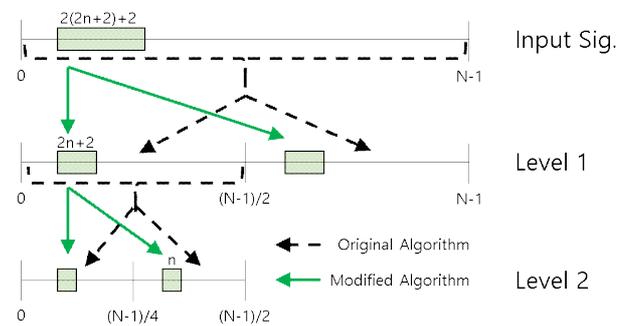


Fig. 4. Original and modified DWT algorithm operation diagram.

샘플 수를 최소화하는 방법을 제안하고, 제안된 방법을 시각적으로 표현한 결과는 그림 4와 같다. Level 2의 detail coefficient는 n개의 샘플 수를 연산하기 위해서 level 1과 입력 신호에 요구되는 샘플 수는 그림 4와 같이 각각 $2n+2$ 개, $2(2n+2)+2$ 개로 근사화할 수 있다. 즉, level 1 DWT 수행 시 입력 신호 N개가 아니라 입력 신호 중 $4n+6$ 개만을, Level 2 DWT 수행 시에도 level 1 단계와 유사하게 $N/2 - 1$ 개가 아니라 $2n+2$ 개만을 DWT 수행하게 되어 효과적으로 DWT 연산 시간을 단축시킨다.

아크 사고 판단을 위한 level 2의 n개 샘플 수가 적을수록 DWT 연산 시간은 효과적으로 단축되지만, 아크 사고 판단의 정확도와 트레이드-오프 관계가 있다. 실험적으로 16개의 level 2 detail coefficient만을 사용하여도 아크 사고 판단이 구현되는 것을 확인하였으나, 40개의 level 2 detail coefficient로 아크 사고를 판단하도록 구현하였다.

3. 실험 결과

개발한 DC 직렬 아크 사고 검출 알고리즘과 아크 사고 검출기의 성능을 검증하는 다양한 조건의 아크 검출 실험을 진행하였다. 실험으로 측정된 아크 사고의 DWT 결과를 통해 아크의 주파수 특성을 분석하고, 아크 사고 검출 알고리즘의 타당성을 분석한다.

3.1 직렬 아크 발생 시스템 구현 및 아크 사고 검출 결과

태양광 시스템의 DC 직렬 아크 사고는 그림 5와 같은 시스템 회로를 설계 및 구현하여 모의하였다. 단상 입력 전원(V1)을 정류하여 커패시터 뱅크(C1)에 300V의 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 발생시켰다.

DC 직렬 아크는 도통 전류의 고주파수 성분으로 측정되며 아크 사고 검출기(Arc Fault Detector)는 로고스키

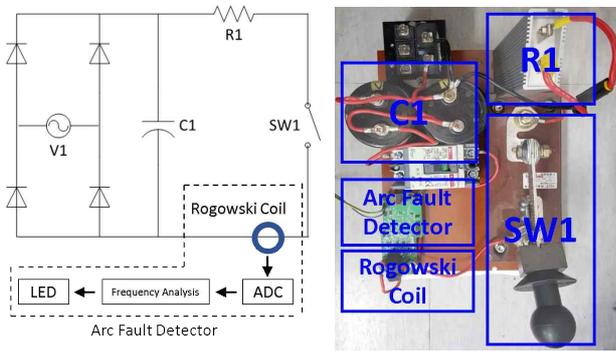


Fig. 5. Circuit of a photovoltaic DC series arc fault detection and block diagram of an arc fault detector.

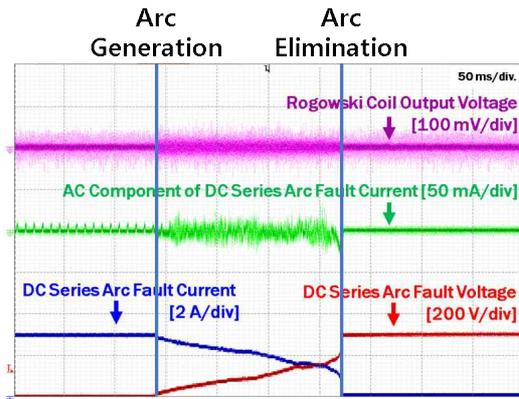


Fig. 6. Experimental waveform of a photovoltaic DC series arc fault detection.

코일로 도통 전류의 아크 정보를 입력 받는다. 단상 태양광 발전 시스템의 아크 검출기에 사용되는 전류 트랜스포머를 로고스키코일로 대체함에 따라 50A 이상의 대용량 태양광 발전 시스템에서도 개발한 아크 검출기의 적용이 가능하도록 설계 하였다. 로고스키코일의 출력인 DC 직렬 아크 전류의 고주파수 성분은 16bit, 238kSPS 로 ADC가 수행되고, DWT로 주파수 정보를 기준 삼아 아크 사고 발생을 판단하여 사용자에게 LED 점멸을 통해 아크 사고 발생 정보를 시각적으로 전달한다.

제작된 직렬 아크 발생 시스템의 SW1을 턴-오프 시킴에 따라 DC 직렬 아크가 발생하고 이때 측정된 아크 전압과 전류 파형은 그림 6이다. DC 직렬 아크 사고 전압은 SW1의 양단에서 측정되었고, 아크 발생에 따라 스위치 양단 전압은 0V에서 상승하기 시작한다. 이와 동시에 DC 직렬 아크 사고 전류는 3A에서 0A로 감소하기 시작하며, 발생한 직렬 아크가 부하 저항 외에 추가적으로 회로에 추가되는 임피던스와 같다는 것을 보여준다. 또한, 측정된 전류의 AC 성분을 보면 아크 발생에 따라 도통 전류에 고주파수 성분이 포함되어 있는 것을 나타내며 이는 로고스키코일을 통해 아크 사고 검출기에 전달된다.

300V 3A 조건에서 직렬 아크의 로고스키코일 출력 raw data와 DWT 분석 결과는 그림 7과 같다. Level 1

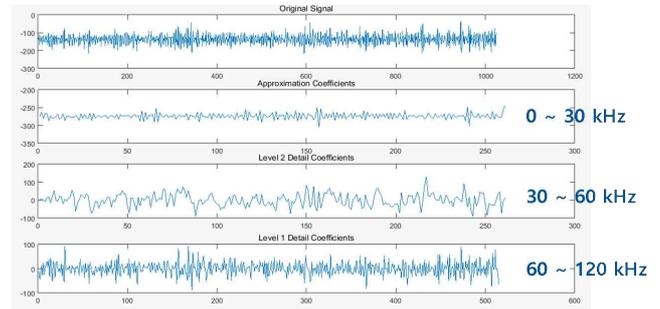


Fig. 7. Raw data and DWT result of 300 V 3 A DC series arc fault condition.

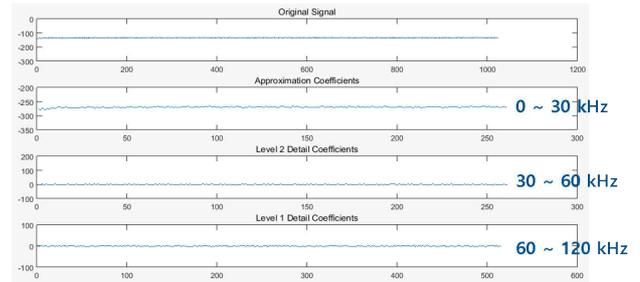


Fig. 8. Raw data and DWT result with a normal photovoltaic operation.

과 level 2의 detail coefficient 결과를 아크가 발생되지 않는 태양광 시스템에서 수행된 DWT 결과 그림 8과 비교하면, 아크 발생 시에서만 30~60kHz 그리고 60~120kHz의 아크 정보가 측정되는 것을 보여주므로 detail coefficient 결과에 따라 신뢰성 있는 아크 발생 유무 판단이 가능하다.

발생한 직렬 아크의 DWT 결과를 시간 성분 측면에서 분석하면, 1024개의 raw data는 발생한 아크 신호의 4.3ms 정보를 ADC 한 결과이다. 즉, 그림 6의 아크는 약 180ms 동안 지속되었고 그 시간 중 2.3%의 구간을 의미한다. Level 1 detail coefficient는 512개의 샘플수로 4.3ms 동안 발생한 아크에서 60~120kHz의 성분이 어느 순간에 존재하는지를 의미한다. 이와 유사하게 level 2 detail coefficient는 256개의 샘플수로 4.3ms 동안 발생한 아크에서 30~60kHz 주파수 정보가 어느 순간에 존재하는지 보여준다. Fast fourier transform(FFT)의 결과는 raw data에서 특정 주파수의 유무를 판단할 수 있지만, 언제 발생했는지 시간에 대한 정보를 표현할 수 없다. 이와는 다르게 DWT 결과는 주파수 정보와 시간 정보가 동시에 표현되고, 이를 활용하여 아크 사고 발생을 판단하는 detail coefficient의 샘플수를 줄임으로써 DWT 알고리즘의 연산 시간을 단축시킬 수 있다.

3.2 아크 사고 검출 알고리즘 연산 속도 향상 결과

아크 사고를 판단하는 DWT 결과의 샘플수를 최소화하여 연산 알고리즘의 속도가 향상된 결과를 그림 9로 정리하였다. 기존 DWT 알고리즘의 경우 약 264ms의

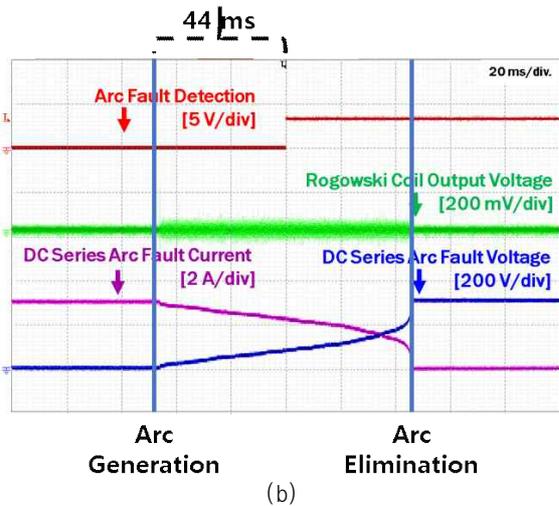
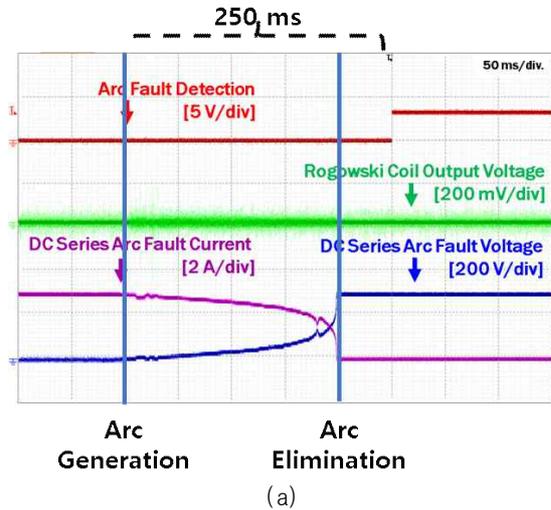


Fig. 9. The improved processing speed result of DWT algorithm. (a) Original DWT processing algorithm, (b) Improved speed DWT processing algorithm.

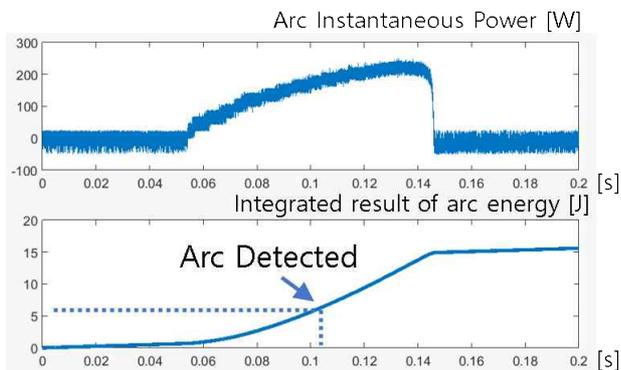


Fig. 10. Calculated instantaneous power and energy of DC series arc.

시간이 소요되지만, 연산 속도가 향상된 DWT 알고리즘의 경우 약 54ms의 시간이 소요된다. 직렬 아크는 300V 3A 조건에서 발생되었고, 반복적인 실험을 통해 평균적으로 약 200ms의 DWT 알고리즘 연산 시간을 단축시키는 것을 확인하였다.

향상된 아크 사고 검출 알고리즘은 UL1699B에서 요구하는 2.5초와 750J 이내에 태양광 시스템의 아크 검출 및 소호 조건을 만족시키기 용이하다. 그림 10은 300V 3A의 아크 발생 조건에서 측정된 전압과 전류 데이터로 계산된 아크의 순시 전력과 에너지 그래프이다. 아크 검출까지 60ms가 소요되었고, 6J의 아크 순시 에너지가 발생하여 요구된 안전규격에 충분한 여유 검출 시간과 에너지를 갖는다.

4. 결 론

본 논문은 대용량 태양광 DC 직렬 아크 사고 검출기에 적용되는 discrete wavelet transform(DWT) 주파수 분석 방법의 연산시간 단축 알고리즘과 이를 활용한 DSP 기반 실시간 아크 사고 검출기의 성능을 분석하였다. 주파수 분석 방법의 경우 널리 사용되고 있는 FFT 방법과는 다른 DWT 방법을 구현하여 모의된 DC 직렬 아크의 주파수 성분을 분석 및 비교하였고, 그 결과 레벨1의 detail coefficient인 30kHz~60kHz 주파수 성분과 레벨2의 detail coefficient인 60kHz~120kHz 주파수 성분이 DC 직렬 아크 사고 발생 시 관측됨을 확인하였다.

측정된 영역의 주파수 범위를 분석하여 아크 사고 발생 유무의 판단이 가능함을 검증하였고, DWT 결과는 시간 성분이 표현된다는 점을 활용하여 DC 직렬 아크 사고 발생 유무 판단 시 ADC된 모든 샘플수에 DWT를 수행하지 않고 detail coefficient의 level 1과 level 2의 샘플수를 선택적으로 사용하는 DWT 알고리즘을 제안하였다. 그 결과 주파수 분석 연산 시간을 기존의 264ms에서 54ms까지 단축시켜 기존 연산 시간의 20%만을 소요하는 DWT 기반 아크 사고 검출 알고리즘을 개발하였으며, UL1699B 안전 규격인 2.5초와 750J 이내에 직렬 아크 사고 검출 및 소호를 가능하게 하는 아크 사고 검출기를 개발하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20192910100090)
 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. NRF2020R1A2C2099663)

References

[1] Q. Xionga, S. Jia, X. Liua, X. Fengb, F. Zhanga, L. Zhua, A. L. Gattozzib, and R. 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] Z. Wang, S. McConnell, R. S. Balog, and J. Johnson, “Arc fault signal detection-fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data,” in *40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO*, pp. 1-6, 2014.
- [3] Underwriters Laboratories 1699B, “Outline of investigation for photovoltaic (PV) DC arc-fault circuit protection,” 1st ed., 2 Aug. 2018.
- [4] S. McConnell, Z. Wang, R. S. Balog, and J. Johnson, “Evaluation method for arc fault detection algorithms,” in *40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO*, pp. 3201-3206, 2014.
- [5] S. Lu, D. Zhang, and T. Phung, “Arcing fault detection in the scenario with renewable energy generation,” in *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China*, pp. 6869-6874, 2017.
- [6] J. S. Walker, *A primer on WAVELETS and their scientific applications*, 2nd Edition, Chapman and Hall/CRC, 2008.
- [7] P. Qi, J. Lezama, S. Jovanovic, and P. Schweitzer, “Adaptive real-time DWT-based method for arc fault detection,” in *27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, Germany*, pp. 563-568, 2014.
- [8] A. F. Ilman and Dzulkifli, “Low voltage series arc fault detecting with discrete wavelet transform,” in *International Conference on Applied Engineering (ICAE), Batam, Indonesia*, pp. 1-5, 2018.
- [9] R. D. Telford, S. Galloway, B. Stephen, and I. Elders, “Diagnosis of series DC arc faults—a machine learning approach,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 4, pp. 1598-1609, Aug. 2017.



조찬기(趙榮起)

1992년 2월 18일생. 2016년 경희대 정보디스플레이학과 졸업. 2018년 중앙대 에너지공학과 졸업(석사). 2020년 동 대학원 에너지시스템공학과 졸업(공박). 2020년~현재 국방과학연구소 선임연구원.



안재범(安載範)

1992년 7월 25일생. 2019년 국민대 전자공학부 졸업. 2019년~현재 중앙대 에너지시스템공학과 석사과정.



이진한(李鎭韓)

1993년 3월 9일생. 2019년 한밭대 전기공학과 졸업. 2020년~현재 동 대학원 에너지시스템공학과 석사과정.



이기덕(李起德)

1984년 10월 10일생. 2009년 배재대 정보통신공학과 졸업. 2019년~현재 O&M KOREA 연구소 연구원.



이진(李眞)

1991년 5월 18일생. 2017년 한밭대 전기공학과 졸업. 2020년 고려대 전기전자공학과 졸업(석사). 2020년~현재 O&M KOREA 연구소 연구원.



류홍제(柳泓齊)

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2004년~2005년 미국 위스콘신 메디슨대 초빙연구원. 1996년~2015년 한국전기연구원 전기추진연구본부 책임연구원(팀장, 랩장, 센터장). 2005년~2015년 과학기술연합대학원 에너지변환공학 책임교수. 2015년~현재 중앙대 에너지시스템공학부 교수. 당 학회 학술위원장.