Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2022) 36(5) : 38～45
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2022.36.5.038 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 36-5-5

태양광 시스템에서의 Arc Fault Detector 개발을 위한 DC 모의 아크 주입 기법

(DC Simulated Arc Injection Method for Arc Fault Detector Development In Photovoltaic System)

이진한* · 안재범* · 이진** · 김용주** · 류홍제†
(Jin-Han Lee · Jae-Beom Ahn · Jin Lee · Yong-Joo Kim · Hong-Je Ryoo)

Abstract

UL 1699B (1st version, Underwriters Laboratories, U.S.A.) was issued with the title of "Standards for Safety: Photovoltaic DC Arc Fault Circuit Protection" in 2018. Complying the standard, we need to go through the long and rigorous work to prove the reliability of AFD, whether it satisfies the test standard. Definitely, one of the key issues has been the unwanted trip caused by harmonic frequencies from a site dependent photovoltaic inverter. Avoiding the intense work dedicated to DC arc fault production, the generation process of simulated DC arc signal has been developed as one simple method to help the research staffs working in the laboratories of arc fault detection. In order to produce the load current of the photovoltaic system that changes according to the amount of insolation, the DC arc is generated at 4.5A, 5.5A, 6.5A, and 7.5A in the laboratory according to UL1699B. The DC arc signal datas are each compare with real DC arc signal from the DWT and FFT process, were injected to the photovoltaic circuit through the D/A process. In this paper, the test result obtained from the 50 kW photovoltaic system explains the validity of simulated DC arc signal that is compatible with a real DC arc fault event.

Key Words : DC arc fault detection, DWT, FFT, Simulated DC arc signal

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* M.S. and Ph.D. course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https://orcid.org/0000-0001-7479-7663
https://orcid.org/0000-0003-2881-8931
** Researcher, Research & Development Center, O&M, Korea
https://orcid.org/0000-0002-1243-1401
https://orcid.org/0000-0002-0982-3535
Received : March 29, 2022
Revised : May 11, 2022
Accepted : May 16, 2022

1. 서 론

중대형 태양광 시스템의 접속반은 태양광 패널과 가까운 실외에 설치되어 비, 눈, 먼지 및 기타 화학 물질 등으로 오염되기 쉽다. 이로 인하여 접속반 내부 및 외부의 배선 연결부가 오랜 기간에 걸쳐 녹슬거나 산화되며, 한편으로 공사 부실로 접촉 불량 혹은 절단되는 현상에 의하여 DC 아크가 발생하고 화재 사고로 확대되어 재산피해를 겪는 사례들이 점차 많이 발생하고 있다[1]. 따라서 태양광 시스템 화재의 주요 원인인 DC 아크를 조기에 검출 및 차단할 수 있는 장치로서 주로 FFT (Fast Fourier Transform) 연산 방식이 적용된 상용화 AFD (Arc Fault Detector) 장치가 사

Copyright ⓒ 2022 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용되었다[2-5]. 하지만 현장에 따라 인버터 스위칭 고조파 주파수 대역과 DC 아크 주파수 대역(10kHz ~ 100kHz)이 중첩되는 경우가 있으며, 현장의 인버터 고조파 신호가 DC 아크 신호보다 커서 FFT 방식이 적용된 AFD 장치가 오동작하는 경우가 빈번히 발생되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 DC 아크 검출 및 오동작 시험을 규격화한 UL 1699B가 2018년도에 새롭게 제정되었으며, DC 아크 검출 장치의 오동작 관련 표준 시험 절차를 제안되었다.

이에 따라서 학계 및 산업계에서는 FFT 방식에 의한 DC 아크 검출 기법의 한계를 극복하기 위하여 WT (Wavelet Transform) 연산 기법과 ANN (Artificial Neural Network) 등의 AI (Artificial Intelligence) 기법을 적용[6]하여 신뢰성 있는 DC 아크 검출 장치의 개발이 진행되고 있다. 그러나 새로운 기법이 적용된 신뢰성 높은 DC 아크 검출 장치의 개발을 위해서는 장기간에 걸쳐 다양한 현장에서 제안된 기법을 검증해야 하는 어려움이 있다.

본 연구는 현장에서 실제 DC 아크를 발생하기 어려운 여러 가지 상황 및 문제점을 극복하기 위하여 개발된 모의 DC 아크 제작 및 주입 기법에 대하여 설명하며, DC 아크 신호 검출의 신뢰성을 확인할 수 있는 추출 변수를 제안한다. 또한 실제 DC 아크와 모의 DC 아크에서 발생하는 주파수 및 시간 특성을 Multi level DWT 기법과 FFT 분석을 통하여 비교 분석한다. 마지막으로 50kW 태양광 시스템이 설치된 현장에서 병행하여 실시된 모의 DC 아크 검출 시험 결과와 실제 DC 아크 검출 시험 결과가 일치함으로써 오동작하지 않는 AFD 개발에 편리하고 유용한 도구로서 모의 DC 아크 신호가 사용될 수 있다는 것을 입증한다.

2. DC 아크 발생 및 측정 장치

DC 아크 검출 실험을 위해 UL1699B의 Arcing Test Condition을 만족하는 DC 아크 발생 장치와 태양광 발전 모의 회로를 Fig. 1과 같이 구축한다[7, 8]. DC 아크 발생 장치는 Fig. 2와 같이 직렬 아크 공극 거리(0.8mm~2.5mm)와 공극 이격 속도(2.5mm/sec ~ 5mm/sec)를 전동식으로 제어하도록 제작된다. 그리고 태양광 발전을 모의한 DC Power Supply (Keysight N8957A, 1,500V, 30A, 15kW), UL 1699B의 Component Values for Arc Fault Test Circuit에서 정의한 80m 선로의 태양광 발전 시스템 모의 회로인 Decoupling Network와 Line Impedance 장치가 제작되었다. 또한 계통 연계는 3상 Inverter(DASS 20i, 6 Ch string, 1,000VDC, 30A, MPPT 480~800VDC)로 구성한다. DC 아크 측정 장치는 Texas Instrument의 TMS320F28335 DSP에 기반한 외부 ADC Chip(16bit, 800 KSPS) 그리고 100kHz 이하의 Inverter 고조파 잡음 제거용 고주파 대역 통과 필터로 구성한다(Fig. 3). 가장 중요한 DC 아크 검출 센서로는 연구실에서 자체 제작한 고주파 CT(TDK, N87, 비투자율: 2,200, 포화자속밀도: 490mT)를 사용하며 코일에 감는 턴수 조절을 통하여 부하전류가 10A까지 흐르는 태양광 시스템의 각 스트링에서도 포화 현상 없이 전류 측정이 가능하다(Fig. 4).

3. DC 아크 검출 및 판정

DC 아크 센서와 DC 아크 측정 장치를 통해 측정된 신호를 DWT[9-12] 기법으로 처리하여 DC 아크 신호의 검출 및 판정하는 단계를 아래와 같이 설명한다. 첫 번째 단계로는 고주파 대역 필터(100kHz ~400kHz)를 통과한 DC 아크 신호는 ADC Chip의 샘플링 속도인 800KSPS로 1,024개의 측정값이 저장된다.

두 번째 단계로는 Fig. 5와 같이 고주파 대역 통과 필터와 ADC를 통하여 측정된 값은 DWT (mother wavelet: Daubechies 4) 기법의 MSD (Multi-level Signal Decomposition) 작업을 통하여 Level 1(A1, D1)부터 Level 4(A4, D4)의 값으로 분류한다[13].

마지막 세 번째 단계로 MSD 과정에서 D1 (200kHz ~400kHz 대역의 주파수 및 시간 성분이 포함된 Detail 신호) 성분으로부터 파라미터를 이용하여 값을 추출한다. 사용한 파라미터는 DPM (Displacement)을 선정하였으며 D1 성분 크기의 변화율의 값을 추출하여 DC 아크 사고 발생 여부를 판정한다.

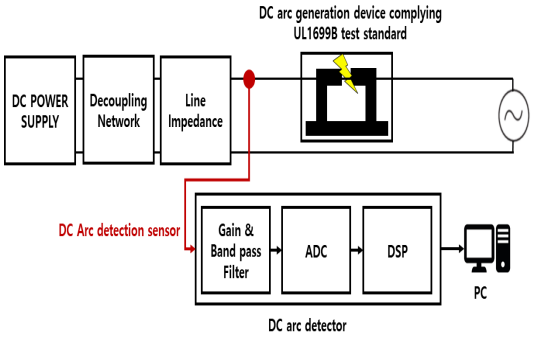


Fig. 1. DC series arc test system based on UL1699B

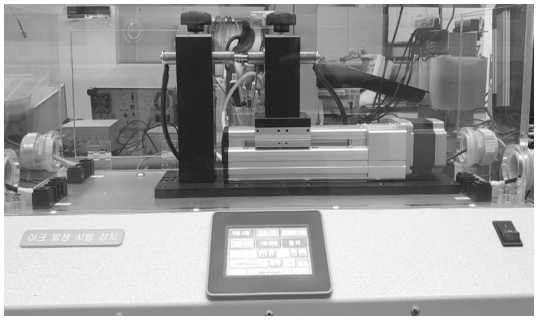


Fig. 2. DC arc generation device complying UL1699B test standard

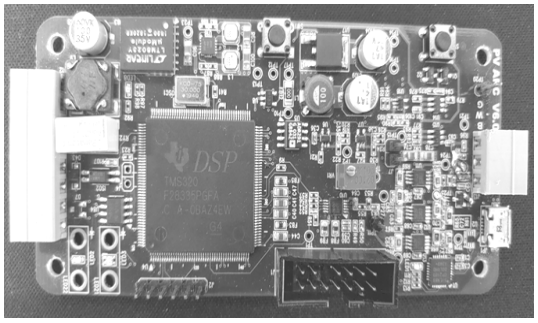


Fig. 3. DC arc detector

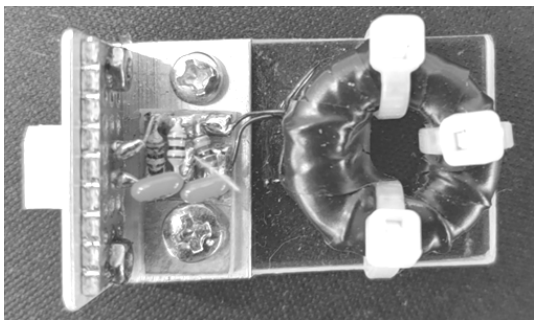


Fig. 4. DC arc detection sensor

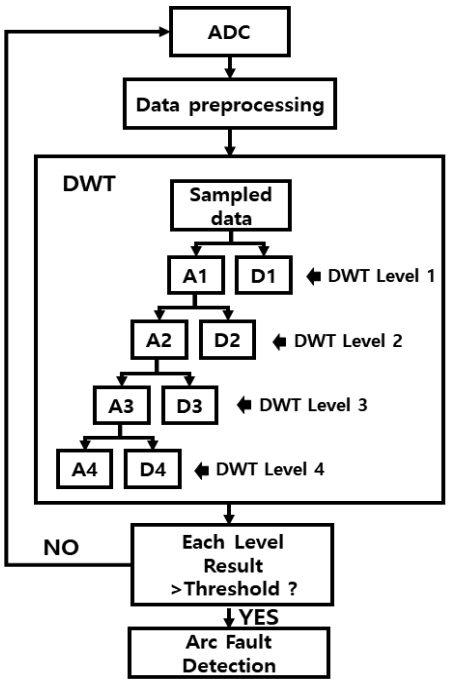


Fig. 5. Multi level discrete wavelet transform algorithm flowchart

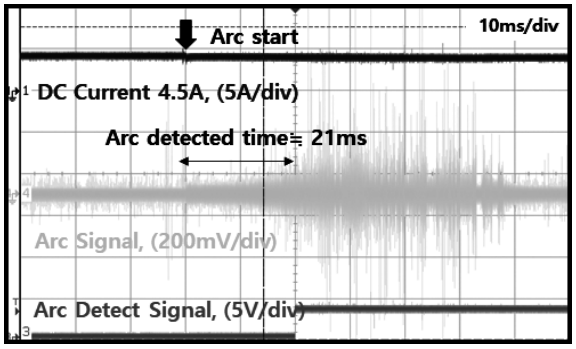
4. DC 모의 아크 제작

DC 아크 발생 및 검출은 Fig. 1~Fig. 5에서 개발된 장치와 센서 그리고 DWT 기법을 적용하여 UL1699B 시험 표준에 준수하여 실시된다.

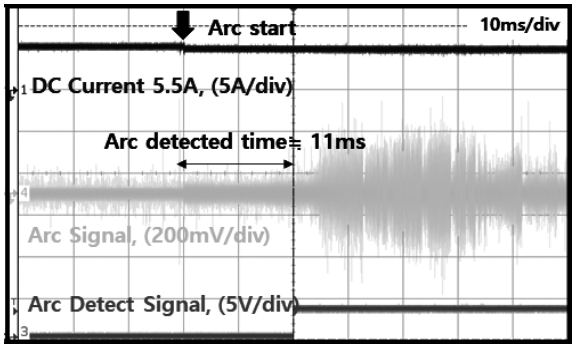
Fig. 6 ((a)-(d))는 일사량에 따라 변화하는 태양광 부하전류(4.5 A, 5.5 A, 6.5 A, 7.5 A) 조건에서 실시된 DC 아크 발생 신호 및 검출된 오실로스코프 파형을 각각 보여준다. DC 아크 신호의 크기와 아크 지속 시간은 부하전류의 크기에 따라 다르다.

Fig. 6에 도시된 것과 같이 부하전류가 증가함에 따라 아크 신호의 크기와 아크 지속 시간이 감소하며, 아크가 발생한 전극 표면의 위치에 따라서 아크 신호가 다른 특징이 있어서 각 부하전류에 따른 DC 아크 신호를 측정한다.

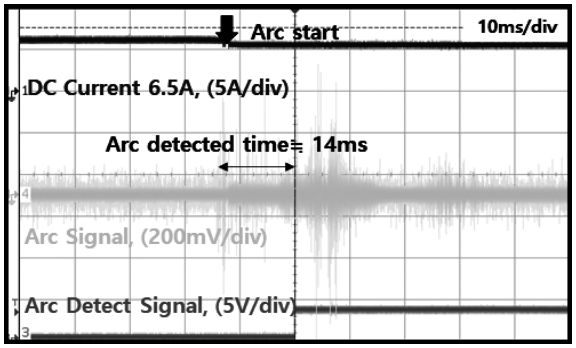
DC 모의 아크 제작은 Fig. 6((a)-(d))에서 검출된 DC 아크 검출 신호를 기반으로 제작된다. 측정된 DC 아크 신호는 고주파 대역 통과 필터를 거친 신호로서 인버터에서 발생하는 50kHz 미만의 노이즈 신호가 포함되지 않은 순수한 DC 아크 신호 성분이다.



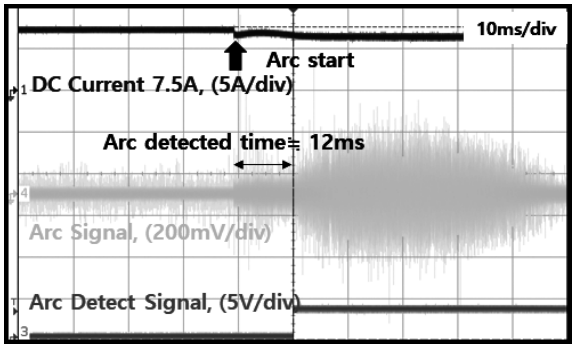
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Arc experiment waveform by load current (a) 4.5A, (b) 5.5A, (c) 6.5A, (d) 7.5A

아크 검출 시간은 본 연구에서 개발된 DC 아크 검출 장치와 DWT 알고리즘을 적용하고 정상치와 아크 발생 시의 S/N (아크 신호/정상 신호) 비율을 1.5로 선정 시에 4.5A~7.5A 부하전류에서 25msec 이하로 측정된다.

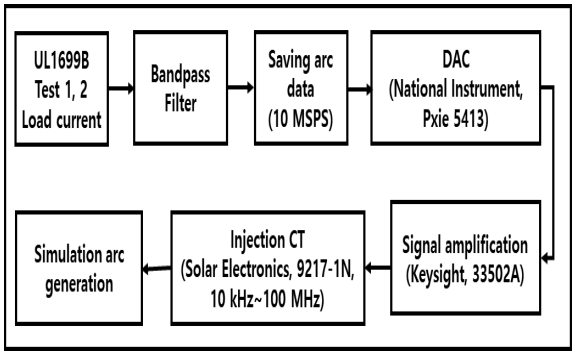


Fig. 7. Simulated DC arc generation, injection and detection process

모의 DC 아크 제작, 주입 그리고 아크 검출과정을 도식화하여 Fig. 7과 같이 나타난다. 먼저 오실로스코프에서 10 MSPS ADC 속도로 취득된 DC 아크 신호를 CSV 형식으로 저장된다.

저장된 DC 모의 아크 신호는 DAC 모듈(National Instrument, PXie 5413: 2Ch DAC, 20MHz, -12V~+12V, 16bit)을 거쳐 출력된다. 출력된 DC 모의 아크 신호는 신호 증폭기 (Keysight, 33502A, 2Ch, 50Vpp, 300MHz)를 통하여 DC 모의 아크 신호의 크기가 보정되며 Injection CT (Solar Electronics, 9217-1N, 10kHz~100MHz, 100W, 26A)를 통해 태양광 시스템 회로에 주입된다.

Fig. 8은 실제 DC 아크와 모의 DC 아크 신호를 주파수 및 시간 분석 방식인 DWT와 FFT 작업 수행 결과를 나타낸다. DC 모의 아크 신호가 실제 DC 아크 신호보다 큰 것은 Injection CT를 통하여 태양광 시스템 회로로 주입 시에 DC 모의 아크 신호 감쇄의 보정 역할을 한다.

아래 Table 1는 각 전류에 따른 정상 상태, 실제 DC 아크 및 DC 모의 아크의 DPM1 값을 보여준다.

부하전류 4A~6A 범위에서는 실제 DC 아크와 DC 모의 아크의 DPM1 값의 오차는 2% 이내이지만 부하

전류가 6A~7A 범위에서는 DC 아크 에너지가 커서 DPM1 오차는 10%로 크게 확대된다.

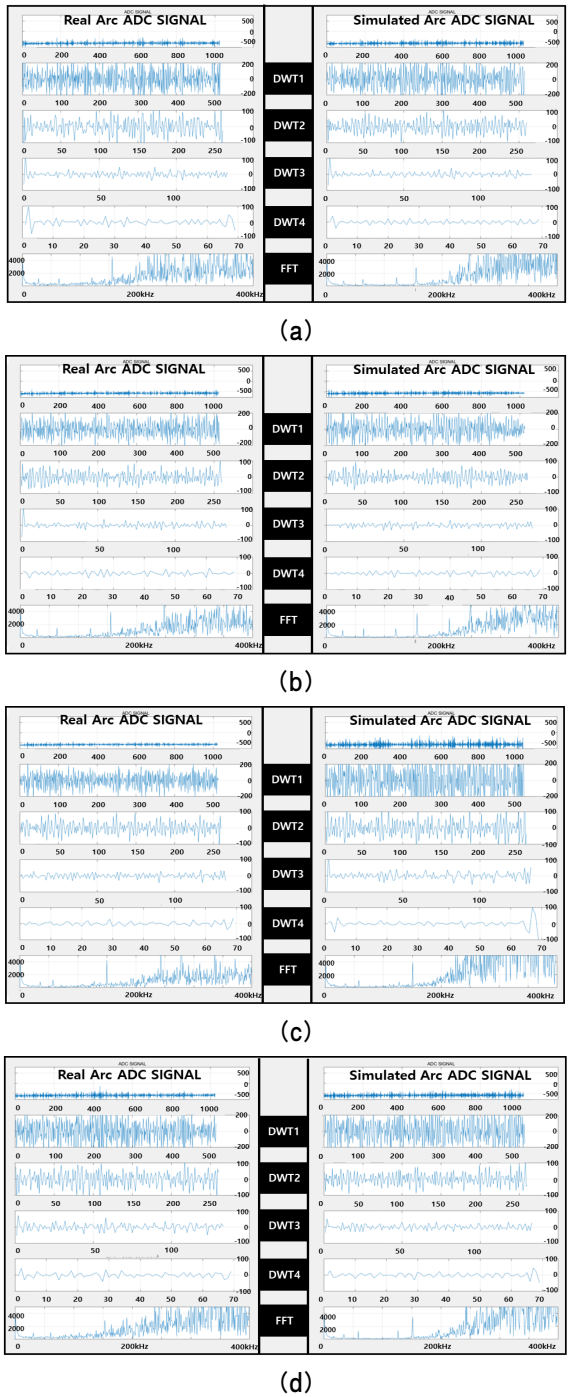


Fig. 8. DWT and FFT analysis results of real arcs and simulated arcs
(a) 4.5A, (b) 5.5A, (c) 6.5A (d) 7.5A

Table 1. Results of DPM1 values for each load current

Laboratory		
Load current	State	Value
4~5A	normal DPM1	35
	DC arc DPM1	88
	simulated DC arc DPM1	90
5~6A	normal DPM1	37
	DC arc DPM1	70
	simulated DC arc DPM1	68
6~7A	normal DPM1	40
	DC arc DPM1	70
	simulated DC arc DPM1	84

5. 현장에서의 모의 아크 실험

50kW의 태양광 시스템에서 Fig. 9와 같은 시험 장치를 이용하여 시험을 진행하였다. 본 시험은 일사량에 따라 변화하는 PV 인버터의 부하전류 4A 부터 7.2A의 조건에서 DC arc generation device를 통한 DC 아크 발생과 injection CT를 통해 제작된 DC 모의 아크를 PV 시스템에 주입 시킨다. 발생시킨 DC 아크와 제작된 모의 아크 신호가 AFD를 통해 아크 신호가 검출되면 AFD는 검출된 신호를 출력하게 되며 오실로스코프와 PC의 연결을 통해 아크 파형과 DWT 결과 분석 단계를 거치며 진행된다.

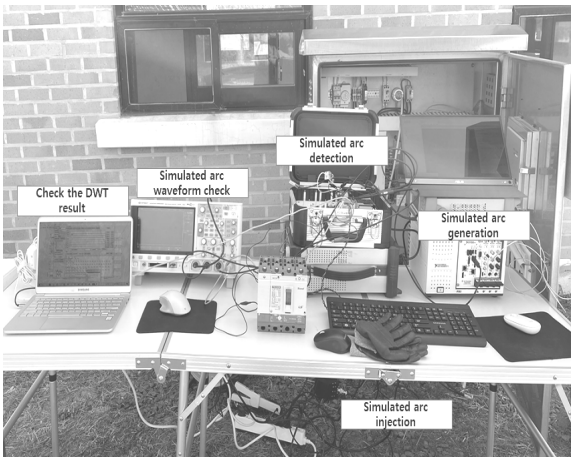
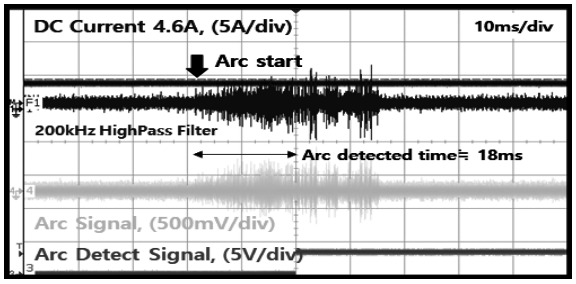
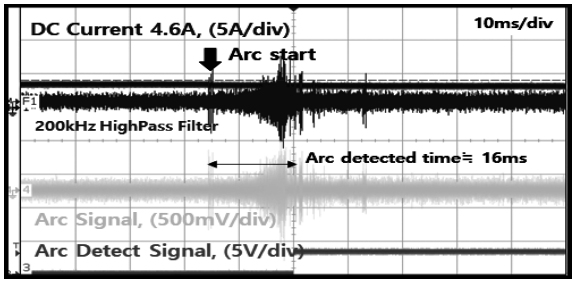


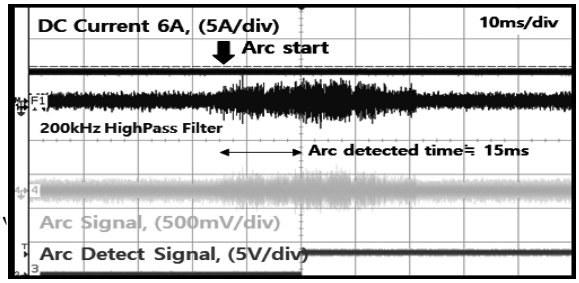
Fig. 9. Simulated DC arc experiments in a 50kW PV system



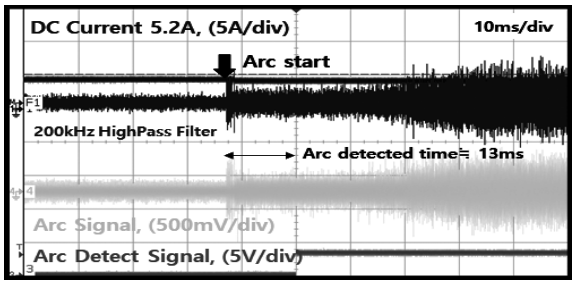
(a)



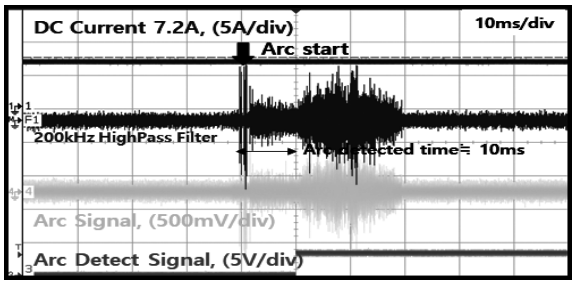
(b)



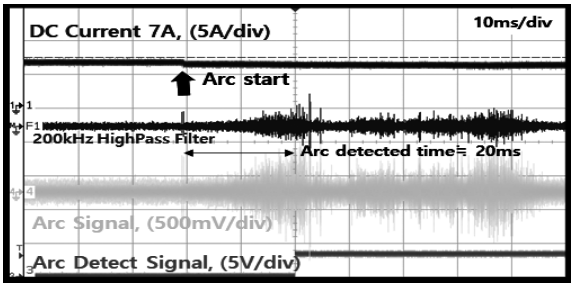
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 10. Comparison of DPM1 between simulated DC arc and real DC arc

Table 2. Results of DPM1 values for each load current

PV system (50kW)		
Load current	State	Value
4~5 A	normal DPM1	94
	DC arc DPM1	179
	simulated DC arc DPM1	169
5~6 A	normal DPM1	115
	DC arc DPM1	200
	simulated DC arc DPM1	209
6~7 A	normal DPM1	125
	DC arc DPM1	257
	simulated DC arc DPM1	265

PV 시스템에서 발생하는 DC 아크는 전극의 표면 상태와 아크 전압, 부하전류 그리고 공극의 이격 속도에 따라 아크 신호의 크기와 형태가 다르며, Fig. 10에 표현된 것처럼 통상적으로 10% 정도의 오차를 갖는다.

Fig. 10 ((a)~(b)) 파형에서는 위로부터 DC 전류(4.6 A), DC 아크 신호의 200kHz High Pass Filter 통과 파형, DC 아크 검출 신호를 각각 나타낸다. Arc Signal의 경우 AFD 보드의 출력이다. 그리고 Table 2는 PV 시스템의 정상 상태의 DPM1 값, 연구실에서 제작한 DC 모의 아크 신호의 DPM1 값 그리고 실제 DC 아크 신호의 DPM1 값을 각각 나타낸다. 정상 운

전 시의 DPM1 값은 PV 시스템의 인버터에서 발생한 고조파로 인하여 94~125 정도를 나타내고 있다.

Fig. 10 ((a)-(f))에 표시된 파형과 Table 2는 Fig. 8 ((a)~ (c))와 마찬가지로 부하전류가 6A, 5.2A, 7.2A, 7A 경우에 DC 모의 아크와 실제 DC 아크를 시험한 결과를 나타낸다.

부하전류가 4.6A에서 7.2A로 증가하는 경우 정상 상태의 DPM1 값은 94에서 125로 약 30% 증가했으며, DC 아크 발생 시에는 179에서 225로 25% 증가하였고, DC 모의 아크의 경우 169에서 265로 50% 증가하였다.

DC 아크 발생 시의 DPM1 값은 아크가 발생하지 않는 PV 시스템 정상 운전 상태의 DPM1 값에 비하여 1.7~2.1배 정도 증가된다.

이처럼 제작된 DC 모의 아크 신호는 시스템이 다른 환경 조건에서도 아크를 검지하는 S/N 비율의 감쇄가 없었으며 연구실의 노이즈와 비교해 더 큰 노이즈가 발생하는 시스템 환경 조건에도 신호의 감쇄 현상도 발생하지 않아 신뢰성이 보장된다.

6. 결 론

본 논문은 태양광 시스템의 DC 아크 검출을 위한 AFD 개발 환경에서 개발 시간 단축과 다양한 DC 아크 검출 알고리즘을 연구실에서 편리하게 검증할 수 있는 DC 모의 아크 신호의 제작 과정에 대하여 설명하였으며 제작된 모의 아크 신호를 50kW PV 시스템에서 실제 DC 아크와 비교하여 신호 대비 5% 오차 이내에서 DC 모의 아크 신호의 타당성을 입증하며 향후 더 정확한 모의 아크 신호 개발을 위하여 연구할 예정이다.

Acknowledgement

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF), Korea government (MSIT) (NO. NRF2020R1A2C2099663) and in part by the "Regional Innovation Cluster Development Program (R&D, P0016220)" supervised by the Korea Institute for Advancement of Tecnology(KIAT).

References

[1] Wu, Z., et al., "A Review for Solar Panel Fire Accident Prevention in Large-Scale PV Applications," IEEE Access, Vol. 8, pp. 132466-132480, 2020.

[2] Cho, C. G., et al., "DC Series Arc Fault Characteristic Comparision Of A Fast Fourer Transform Result," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagonosis (CMD), pp. 218-221, 2020.

[3] Fitrianto, M. I., et al., "Identification and Protection of Series DC Arc Fault for Potovoltaic Systems Based on Fast Fourier Transform," Proc. of the 2019 International Electronics Symposium (IES), pp. 159-163, 2019.

[4] Nashrulloh, M. Z., Prasetyono, E., and Anggriawan, D. O., "Mapping Detection Of DC Series Arc Fault Based on Fast Fourier Transform," Proc. of the 2021 International Electronics Symposium(IES), pp. 582-587, 2021.

[5] Syafi'i, M. H. R. A., et al., "Real Time Series DC Arc Fault Detection Based on Fast Fourier Transform," Proc. of the 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications, pp. 25-30, 2018.

[6] Yi, Z. and Etemadi A. H., "A Novel Detection Algorithm for Lin-to-Line Faults in Photovoltaic (PV) Arrays based on Supprt Vector Machine (SVM)," Proc. of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-4. 2016.

[7] UL Standard, "Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-fault Circuit Protection," Standard 1699B, 1st ed., 2018.

[8] Cho, C. G., et al., "Comparison of Series Arc Fault Measurement Signal Between a Rogowski Coil and Current Transformer," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 34, No. 4, pp. 52-58. 2020.

[9] Wang, Z. and Balog, R. S., "Arc Fault and Flash Detection in DC Photovoltaic Arrays Using Wavelets," Proc. of the 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 1619-1624. 2013.

[10] Ahn, J. B., et al., "PCA-Based Arc Detection Algorithm for DC Series Arc Detection in PV System," Proc. of the 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 258-261, 2021.

[11] Ahn, J. B, et al., "Implementation of Test Facility for DC AFCI Performance Evaluation based on UL1699B Standard," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 35, No. 9, pp. 9-15, 2021.

[12] Cho, C. G., Han, J. B., Lee, J. H., and Ryoo, H. J., "DC Series Arc Fault Detector Based on the Discrete Wavelet Transform Algorithm for a Large Photovoltaic System," Proc. of the KIPE Conference, pp. 1-3, 2020.

[13] Walker, J. S. "A Primer on WAVELETS and Their Scientific Applications," Chapman and Hall/CRC, 2nd ed., 2014.

Biography



Jin-Han Lee

He received the B.S. degree in electronic engineering from Hanbat University, Daejeon, South Korea, in 2020. He is currently pursuing his M.S. degree at the Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interest is an arc fault detection in DC PV systems.



Jea-Beom Ahn

He received the B.S. degree in electronic engineering from Kook-min University, Seoul, South Korea, in 2019. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include power electronics and high-voltage pulse power systems.



Jin Lee

He received the B.S. degree in electronic engineering from Hanbat University, Daejeon, South korea, in 2017 and received M.S. degree at the electric-electronic Engineering, Korea University in 2020. Since 2020, he has been a researcher of Research & Development Center on O&M KOREA, Daejeon. His current research interest is an arc fault detection in DC PV systems.



Yong-Joo Kim

He was born in Korea, 1953. He received his B.S. degree in Electrical Engineering from Seoul National University, Korea, 1975. In 1979 he joined KERI(Korea Electrotechnology Research Institute), as a researcher at High Power Laboratory. He received his Master and Ph.D. degree in Electric Power Engineering from Rensselaer Polytechnic Institute, USA, 1984 and 1987 respectively. From 1996 to 2003, he served as a project manager for Korean High Speed Train Development. He has been a visiting professor at Kyushu Institute of Technology, Japan, 2010. In 2014, he retired from KERI. Since 2015, he is an adjunct professor at Chung Ang University, Korea. From 2016 to 2018, he had been the expatriate professor at Adama Science and Technology University, Ethiopia. His research interests include rotating machine diagnosis and DC arc detection. Since 2016, he is a CTO at O&M Korea.



Hong-Je Ryoo

He (M'17) received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is a Senior Member of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, a Planning Director of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminating & Electrical Installation Engineers.