Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2021) 35(9) : 9～15
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2021.35.9.009 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 35-9-2

DC AFCI 성능평가를 위한 UL1699B 표준에 따른 시험설비 구축

(Implementation of Test Facility for DC AFCI Performance Evaluation based on UL1699B Standard)

안재범* · 이진한* · 조현빈* · 이진** · 류홍제†
(Jae-Beom Ahn · Jin-Han Lee · Hyun-Bin Jo · Jin Lee · Hong-Je Ryoo)

Abstract

This paper deals with the implementation of test facility for DC AFCI(Arc fault circuit interrupter) series arc detection performance evaluation based on UL1699B standard. The implemented test facility consists of DC source, decoupling network, line impedance, inverter and arc generator. The developed electric arc generator enables precise control for spacing between the arc electrodes. Implemented test facility complies with a single full string model presented on UL1699B. Mode 1 to Mode 4 are presented as test modes. The test conditions of inverter voltage, current, minimum arc current conditions, electrode separation speed and distance are satisfied by implemented test facility when arcing occurred in all test modes. Also the series arc detection performance evaluation result of DC AFCI under the mode 1 condition is presented. The implemented test facility is expected to be applied to the series arc detection performance evaluation of DC AFCI under all test mode conditions.

Key Words : Arc generator, DC AFCI, PV system, Series arc, UL1699B

1. 서 론

2020년 기준 최근 5년간 국내 태양광 발전시설 및 태양광 발전시설과 연계된 ESS 시스템에서의 화재 발생 건수는 약 338건에 달하며, 피해 규모는 약 355억 원에 달한다. Fig. 1은 2013년 8월 미국의 Nordeney 지역의 PV 시스템에서 아크 화재가 발생하여 수백만 유로의 재산 피해가 발생한 사례이다. PV 시스템 화재 사고의 주된 원인으로는 아크사고, 지락사고, 태양광 모듈 소손으로 인한 사고가 있으며, 이중에서도 태양광 아크는 접속반 내부의 이물질이나 단자의 소손 등으로 인해 발생할 수 있다[1-3]. 태양광 발전시설에서 발생하는 DC 아크는 통전 전압과 전류가 영점을 지나지 않기 때문에 스스로 소호되지 않는 문제가 있으며, 따라서 아크 발생시 전력을 차단하는 보호 장치가 필요하다. 그러나 직렬아크 발생의 경우 선로에 아크로 인한 임피던스가 추가되는 영향이 있어 오히려 통전 전류의

† 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/0000-0003-2881-8931
https://orcid.org/0000-0001-7479-7663
https://orcid.org/0000-0003-1808-1534
** Researcher, Research & Development Center, O&M, Korea
https://orcid.org/0000-0003-4696-6815
Received : July 2, 2021
Revised : August 20, 2021., September 1, 2021
Accepted : September 13, 2021

Copyright ⓒ 2021 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.

크기는 감소하기 때문에 검출에 어려움이 있다. 따라서 주파수 분석기법이나 인공지능 기반 알고리즘 등을 이용한 알고리즘 및 이를 적용한 DC AFCI(Arc fault circuit interrupter)의 개발이 이루어지고 있다[4-7].

한편 2011년 미국에서는 NEC(National Electric Code)를 개정함에 따라 태양광 설비의 노후로 인한 아크 발생 및 화재로 인한 피해를 예방하기 위해 80 V 이상의 태양광 설비에서는 DC AFCI의 설치를 요구하고 있다[8-9]. 또한 이에 따라 2013년 미국 UL(Underwrites Laboratory)은 태양광 DC AFCI의 시험 표준 및 안전 규격을 제시하기 위한 UL1699B를 발표하였고, 2018년 UL1699B First edition이 발행되었다[10]. UL1699B 지침서에는 DC AFCI의 표준 성능 테스트를 위한 시험설비가 제시되며, 다양한 PV 시스템을 모의하기 위한 4가지의 시험모드와 아크발생장치의 형태가 제시된다.

본 논문에서는 태양광 DC AFCI의 성능평가를 위한 UL1699B 표준에 따른 시험설비 구축내용을 다룬다. 논문의 순서로 2장에서는 UL1699B 시험 기준 및 시험설비 구축에 대해 다루며, 3장에서는 DC AFCI에 대한 동작원리와 구축된 시험설비 아크발생시험, DC AFCI의 성능 평가 내용을 다룬다. 4장 결론에서는 구축된 시험설비의 적합성 및 활용도를 정리한다.

2. UL1699B 시험설비

2.1 UL1699B 시험기준

UL1699B에는 Fig. 2와 같이 DC AFCI의 성능 적합조건이 제시된다. 성능 적합조건으로는 제한된 에너지 및 시간 내에 아크검출 및 소호가 제시된다. 영역 A는 모든 테스트에 대해서 2.5초 이내, 아크에너지 200J이내에 아크를 차단하는 것을 의미한다. 영역 B는 2.5초 이내, 아크에너지 750J 이내 아크를 차단하는 것을 의미하며 DC AFCI의 적합성에 요구되는 최소 기준이다. 영역 C는 최소 요구 기준을 초과한 영역으로서 성능 표준에 부합하지 않음을 의미한다.

따라서 아크 검출시 아크 검출 및 차단까지의 시간과 아크가 발생한 시간동안의 아크 에너지를 측정하



Fig. 1. Picture of PV system fire hazard

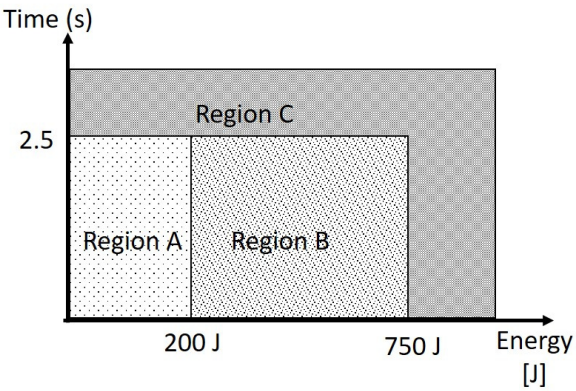


Fig. 2. Arc energy regions for DC AFCI performance criterion

여 DC AFCI의 적합성을 평가한다.

2.2 직렬아크검출을 위한 시험설비 구축

UL1699B 기준 DC AFCI의 직렬아크검출 성능 평가를 위한 시험설비는 Fig. 3과 같이 단일 풀 스트링 모델로 구축되었다. DC 전원장치와 디커플링 네트워크, 선로 임피던스, 아크발생장치, 태양광 인버터로 구성된다. DC AFCI는 인버터의 입력 string에 직렬로 추가되어 성능평가가 이루어진다.

DC Source는 개방전압을 출력하며 선로 임피던스에 의해 전압강하가 발생한다. 또한 이에 따라 인버터는 MPPT 제어에 의해 최대전력점에서의 전압과 전류로 동작된다. 시험 모드에 따라 약 900 W, 2.5 kW, 5 kW 용량의 PV 시스템이 모의된다. Table 1에 시험

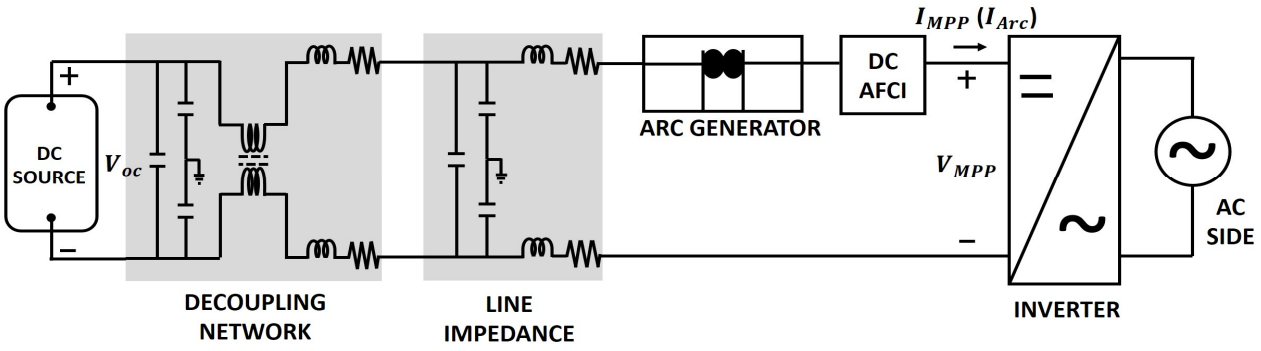


Fig. 3. Circuit of single full string model for DC AFCI performance evaluation

모드에 따른 전압, 전류조건, 그리고 최소 아크전류를 나타내었다. 제시된 시험 모드에서의 동작을 위해 사용된 실험장비의 사양은 Table 2와 같다.

디커플링 네트워크와 라인임피던스는 DC Source와 함께 실제 PV 시스템에서의 태양광 모듈 및 케이블을 모의하기 위한 장치이다. 또한 DC Source나 인버터의 전원이 차단되는 등의 원치 않는 트립 동작을 방지하며, DC AFCI의 아크검출 성능평가를 가능하도록 한다.

각 선로정수는 단일 풀 스트링 모델 기준의 UL1699b에 제시된 파라미터 값을 따르며, 케이블 길이를 약 10m로 가정하여 선로정수가 선정되었다.

Table 1. Arcing test condition

Test no.	V_oc (V)	V_mpp (V)	I_mpp (A)	I_arc_min (A)
1	480	312	3.0	2.5
2	490	318	8.0	7.0
3	490	318	16.0	14.0
4	810	607	8.5	7.0

Table 2. Instrument for evaluation facility

Test equipment	Manufacturer	Specification (Input/ Output)
DC Source (N8957A)	Keysight	400 VAC / 1500V, 30A, 15kW
Inverter (DSP-3320K-J)	Dasstech	630V, 30A / 20kW

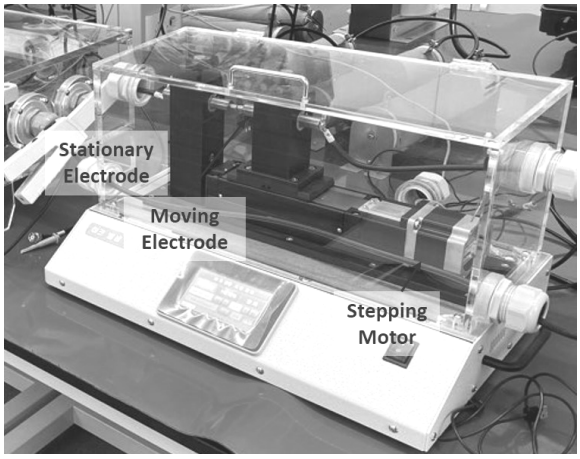


Fig. 4. Arc generator (a) Picture (b) Block diagram

Table 3. Test condition of electrodes separation rate and length

Test no.	Sep. rate (mm/s)	Gap (mm)
1	2.5	0.8
2	5.0	0.8
3	5.0	1.1
4	5.0	2.5

UL1699B 시험모드의 조건에는 Table 3과 같이 아크를 발생시키는 양 전극의 분리 속도와 이격 거리가 제시된다. 이는 mm 단위의 세밀한 단위이며 수동 제어를 통해서는 시험 조건에 부합하는 전극 이격조건을 정확히 만족시키는데 한계가 있다. 정확히 만족시키지 못할 경우 전극의 이격 속도 및 간격의 차이에 따라 발생하는 아크의 전기적 특성에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 시험표준을 충족하기 위해 전동식 아크발생 장치는 Fig. 4 (a)와 같이 스태핑 모터와 구리 전극을 기반으로 개발되었으며 블록도를 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 시험모드에 따라 분리 속도 및 이격 거리 설정이 가능하며, Control Display를 통해 조작함으로서 모터를 제어하여 이동식 전극을 조절함으로써 양 전극을 이격시킬 수 있다. DC AFCI 성능 평가시 두 전극이 완전히 접촉된 상태에서 시험이 시작되며, 시험 모드에 따른 속도 및 간격으로 전극을 이격시켜 아크를 발생시킨다.

3. DC AFCI 및 직렬아크 실험

3.1 DC AFCI 동작원리

DC AFCI는 아크검출을 위한 AFD 회로와 DC 릴레이, 전자 개폐기로 구성된다. Fig. 5는 DC AFCI의 동작 순서를 나타낸다. 먼저 인버터의 입력 string에 직렬로 구성된 AFD 회로는 전류 센서를 통해 DC 전류를 감지한다. 감지된 신호는 아날로그 필터를 거친 후, ADC 모듈을 통해 디지털 신호로 변환되며, 변환된 신호는 디지털신호 처리장치에서 시간 및 주파수 분석방법을 통해 입력된 신호를 분석 및 판별하고 직렬 아크를 검출한다[11]. 검출시 DC 릴레이에 High 신호를 전달하며, 릴레이 및 전자개폐기가 동작됨에 따라 전류가 트립되고 아크가 소호된다.

3.2 시험설비의 직렬아크 발생 실험

단일 풀 스트링 모델로 구축된 시험설비에서 직렬아크 발생 실험이 진행되었다. 모드 1부터 모드 4까지 제시된 시험 조건에 따라 DC Source 전원을 인가한 뒤 인버터 동작 시작 후 MPP 전류에 도달하면 아크발생장치를 조작하여 아크를 발생시킨다. 각 시험모드에서 아크가 발생한 상태에서 측정된 실험 파형은 Fig. 6과 같다. 분홍색 파형은 측정된 인버터의 입력 string 전류, 노란색 파형은 AFD 회로의 전류 센서 출력, 연두색 파형은 AFD 회로에서 ADC 되는 신호이다. 아크발생시의 전류의 크기는 모드 1에서는 약 2.5A, 모드 2에서는 7A. 모드 3에서는 16A, 그리고 모드 4에서는 8A이며, Table 4는 각 시험모드에서 최소 아크전류 조건과 구축된 시험설비의 아크 전류크기를 나타낸다. 모두 최소아크전류 기준을 만족하는 구축된 시험설비의 적합성을 나타낸다.

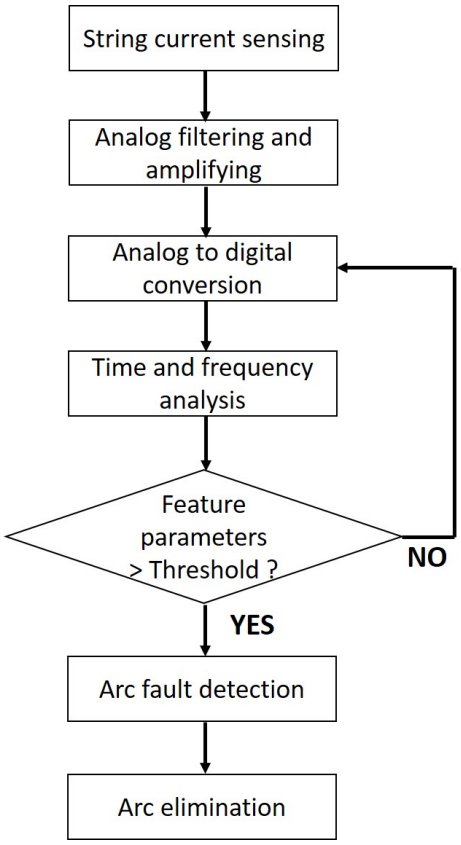
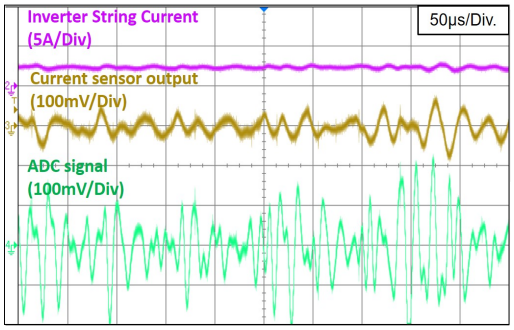


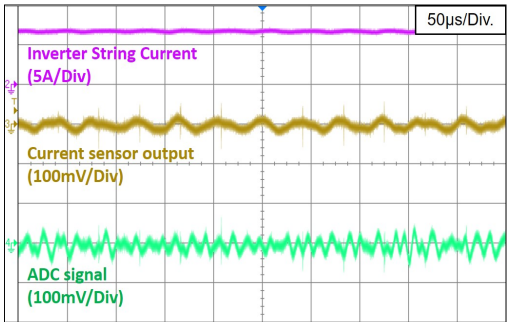
Fig. 5. Flowchart of DC AFCI

3.3 DC AFCI의 직렬아크검출 성능평가

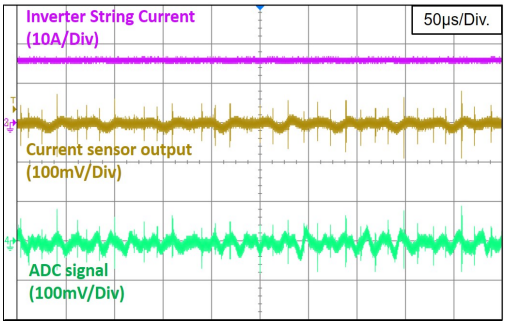
DC AFCI의 직렬 아크검출 성능 평가는 아크발생 시점부터 직렬아크 검출 후 전류가 트립 되는 시간까지의 시간을 측정하고, 측정된 시간동안 발생한 아크



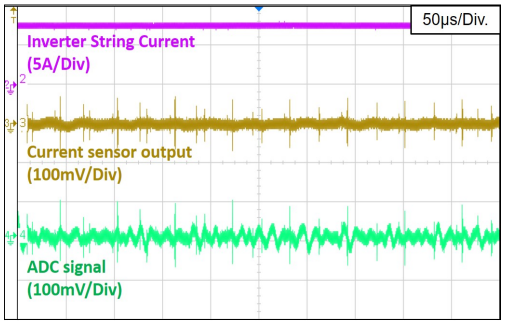
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Experimental waveform of series arc (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4

에너지를 계산하여 UL1699B 기준에 따라 DC AFCI의 적합성을 판단한다. 각 시험모드는 Table 1, 3 의 값을 만족하는 조건에서 DC AFCI의 성능평가가 진행된다. Fig. 7은 시험모드중 하나인 모드 1 조건에서 DC AFCI의 직렬아크검출 성능을 시험한 파형이다. 분홍색 파형은 인버터의 입력 string에 흐르는 전류, 노란색 파형은 아크 전극 간 전압, 파란색 파형은 아크검출 신호를 나타낸다. 아크발생시의 노이즈 성분은 DC AFCI의 전류센서를 통해 센싱되어 AFD circuit board에서의 아크검출 알고리즘에 의해 약 16ms 이후 아크로 검출된다. 검출 후 인버터의 입력 전류가 트립 되기까지 약 21ms가 소요되므로 아크 발생부터 검출까지 약 37ms가 소요되는 결과를 확인할 수 있다. 아크가 발생한 시간동안 발생한 아크에너지는 아크 전류와 전압의 곱을 통해 약 1.48J의 아크에너지가 발생한 것으로 산출된다. 동일한 방식으로 시험모드 1부터 4까지 모두 진행되어야 하며 각 모드는 3번의 직렬아크 검출 시험이 반복 진행되어 평가된다.

Table 4. Comparison of arc current

Test no.	Required I_arc_min(A)	I_arc (A)
1	2.5	2.5
2	7.0	7.0
3	14.0	16.0
4	7.0	8.0

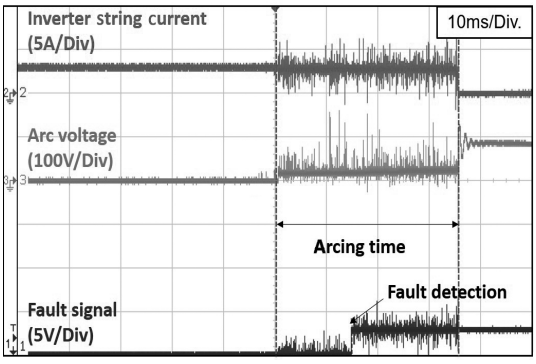


Fig. 7. Experimental waveform of series arc detection with DC AFCI

4. 결 론

DC AFCI의 직렬아크 검출 및 차단 성능 테스트를 위해 UL1699B 표준에 따른 시험설비가 구축되었다. 아크 전극 이격을 위한 정확한 제어를 위해 전동식 아크발생장치가 개발되었으며, 이와 함께 단일 풀 스트링 모델로 시험설비가 구축되었다. 제시된 4가지 시험 모드의 조건이 되는 인버터 전압, 전류, 전극 이격 속도 및 이격 거리를 UL1699B 표준에 부합하게 만족하였으며, 아크발생시의 아크 전류의 크기는 모두 최소 아크 전류 이상이 되도록 만족하였다. 구축된 시험설비를 통해 모드 1 조건에서 DC AFCI의 직렬아크검출 성능평가 되었으며, 향후 동일한 방식으로 모든 시험 모드 조건에서 DC AFCI의 직렬 아크 검출 성능 테스트에 적용될 수 있다. 또한 DC 스위치나 DC-DC 컨버터 등의 추가 구성을 통해 DC AFCI의 Unwanted tripping 성능 평가에도 활용될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by the project titled as Development of DC Arc Interruption Technology and Performance Evaluation Facility for Medium and Large PV System Development(NO. 20192910100090) granted by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea.

References

〔1〕 KwangMuk Park, SunBae Bang, JinYoung Park, JinYoung Park, SeongJun Hong, and SoonHyung Lee, "Fire Statistics and Case Study of Photovoltaic System through Analysis of Fire Status Survey," 51th KIEE Summer Conference, The Korea Institute of Electrical Engineers, 2020.
〔2〕 Allianz Global Corporate and Specialty SE, "Fire Hazard of Photovoltaic (PV) Systems," in Tech Talk, Vol. 8, 2019.
〔3〕 Blog of Solarity, "5 Potential Fire Hazards and Mitigation in Photovoltaic Systems," https://solarity.jo/blog/5-potential-fire-hazards-and-mitigation-in-photovoltaic-systems/ (Accessed 20 MARCH 2020)
〔4〕 Texas Instruments Incorporated, "Application Report: AN-2154 RD-195 DC Arc Detection Evaluation Board," Dec. 2012.
〔5〕 Qing Xiong, et al., "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.
〔6〕 Zhan Wang, Stephen McConnell, Robert S. Balog, and Jay Johnson, "Arc Fault Signal Detection-Fourier Transformation *vs.* Wavelet Decomposition Techniques Using Synthesized Data," 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, USA, pp. 3239-3244, June 2014.
〔7〕 Zhan Wang and Robert S. Balog, "Arc Fault and Flash Detection in Photovoltaic Systems Using Wavelet Transform and Support Vector Machines," 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, USA, pp. 3275-3280, June 2016.
〔8〕 National Electrical Code, NFPA 70, "Article 690 : Solar Photovoltaic (PV) Systems," National Fire Protection Association, 2014.
〔9〕 D. Dini, P. Brazis, and K. Yen, "Development of Arc Fault Circuit Interrupter Requirements for Photovoltaic Systems," 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1790, June 2011.
〔10〕 Underwriters Laboratories 1699B, "Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection," Aug. 2018.
〔11〕 ChanGi Cho, 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, Feb. 2020.

Biography



Jae-Beom Ahn
He received the B.S. degree in electronic engineering from Kookmin University, Seoul, South Korea, in 2019. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include power electronics , high-voltage pulse power systems and arc fault detection in DC PV systems.



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.



Hyun-Bin Jo

He received the B.S. degree in electronic engineering from Catholic University, Bucheon, South Korea, in 2016. He is currently pursuing his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include Grid connected Inverter and high-voltage pulsed-power supply 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, Seoul, 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.



Hong-Je Ryoo

He 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 an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, a senior member of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.