DBpia

Rogowski Coil과 Current Transformer의 직렬 아크 사고 측정 신호 비교

Comparison of Series Arc Fault Measurement Signal Between a Rogowski Coil and Current Transformer

저자
(Authors)

조찬기, 안재범, 이진한, 김용주, 류홍제
Chan-Gi Cho, Jae-Beom Ahn, Jin-Han Lee, Yong-Joo Kim, Hong-Je Ryoo

출처
(Source)

조명·전기설비학회논문지 34(4), 2020.4, 52-58(7 pages)
Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 34(4), 2020.4, 52-58(7 pages)

발행처
(Publisher)

한국조명·전기설비학회
The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers

URL

http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09329507

APA Style

조찬기, 안재범, 이진한, 김용주, 류홍제 (2020). Rogowski Coil과 Current Transformer의 직렬 아크 사고 측정 신호 비교. 조명·전기설비학회논문지, 34(4), 52-58

이용정보
(Accessed)

중앙대학교
165.***.103.27
2020/07/29 10:14 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s)and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s)for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2020) 34(4) : 52～58
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.34.4.052 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 34-4-8

Rogowski Coil과 Current Transformer의 직렬 아크 사고 측정 신호 비교

(Comparison of Series Arc Fault Measurement Signal Between a Rogowski Coil and Current Transformer)

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

Abstract

The protection method for an arc of the photovoltaic generation system affected by the wire aging and poor contact of electrodes has been required. About a household photovoltaic systems, the series arc fault detection circuit and algorithm has been implemented, and the current transformer (CT) is used to detect the arc current. Although the CT is a useful current sensing device under the low current condition of the household photovoltaic systems, it is difficult to adopt for the medium-size photovoltaic generation system because of the saturation of transformer, wire thickness, and limited winding area. In this paper, the possibility of the sensing method using rogowski coil to detect the series arc fault of the medium-size photovoltaic power plant.

Key Words : Photovotaic, Arc Fault Detection, Current Sensor

1. 서 론

1.1 연구의 배경

태양광 발전 시스템의 직렬 아크 검출 안전 기준인 UL1699B는 그림 1과 같이 아크 사고의 종류를 분류, 모의 직렬 아크 사고 검출기의 제작 방법, 그리고 직렬 아크 사고 검출기의 성능 평가 기준을 제시한다. 모의 아크 사고는 발생 된 아크의 시간과 에너지에 따라 3가지 영역으로 구분되며, 아크 검출기는 최종적으로 2.5초 이내 그리고 750J 이내에 아크 사고를 검출해야만 한다. 따라서 UL1699B에 제시된 안전 기준을 만족시키는 직렬 아크 사고 검출기의 연구 개발이 수행되고 있으며, 신호 처리 방법 [1-4]에 대해서 즉 측정한 아크 사고 신호의 분석 방법 또는 노이즈 신호로부터 아크 사고 신호를 분리하는 방법 [5-6] 등이 주된 연구 내용이다.

그러나 직렬 아크 사고 검출기를 태양광 시스템에 실증하는 경우 아크 사고 검출기를 설치할 태양광 패

† Corresponding Author : Dept. of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University
* Dept. of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University
** Research & Development Center, O&M KOREA
Tel : 02-820-5178, Fax : 02-3280-5867
E-mail : pon98095@cau.ac.kr
Received : 2019. 12. 31. / Revised : 2020. 1. 3.
Accepted : 2020. 2. 10.

Copyright ⓒ 2020 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.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)

널의 출력 용량이 고려되어야 하며, 직렬 아크 사고 신호의 측정에 사용되는 전류 트랜스포머는 도선의 굵기, 변압기 포화 등의 문제로 대용량 전류 측정에 어려움이 있고, 이러한 문제점들을 고려하여 전류 트랜스포머를 설계 시 아크 사고 검출기의 크기가 커지는 단점이 있다.

이를 극복하기 위해 본 논문에서는 전류 트랜스포머를 로고스키 코일로 대체하여 제한된 전류 센서의 크기에서도 전류 측정 용량을 키우고, 로고스키 코일의 직렬 아크 측정 전압이 직렬 아크 사고의 발생 유무 판단에 적합한지를 판단하기 위해 전류 트랜스포머의 직렬 아크 사고 측정 전압과 비교 분석한다. 나아가, 전류 센서의 측정 전압을 digital signal processor (DSP) 인 TMS320F28033을 활용해 사용한 analog to digital conversion (ADC)와 샘플링 주파수의 적합성을 판단하고, ADC 결과와 전류 센서의 측정 전압과 동일한지 분석한다.

본 논문의 구성으로는 2장에서 직렬 아크 사고 검출시스템의 동작 순서와 주파수 특성을 설명하고, 3장에서 제작한 직렬 아크 모의 발생 시스템을 활용한 전류 트랜스포머와 로고스키 코일의 아크 신호 측정 결과를 분석한다. 그리고 분석 결과를 바탕으로 DSP의 ADC 측정 결과를 비교하여 직렬 아크의 발생 유무에 따른 신호의 차이를 정리한다.

2. 직렬 아크 사고 검출 시스템

2.1 직렬 아크 사고 신호 검출 순서

직렬 아크 사고 검출 시스템은 태양광 발전 시스템의 출력에 직렬로 결선되어 아크 사고 발생 시 아크 신호의 주파수 성분을 분석하여 사고 발생 유무를 판단하고 사용자에게 아크 사고 발생을 알린다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 직렬 아크 사고 신호 검출 순서이다. 직렬 아크 사고가 전류 트랜스포머나 로고스키 코일의 1차 측에서 발생되면, 전류 센서의 2차 측에 절연된 아크 측정 신호를 생성한다. 절연된 아크 측정 신호는 밴드 패스 필터를 통해 주파수 성분과 신호의 크기가 조절 되고, 외부 ADC IC를 거쳐 DSP에 최종적인 아크 신호가 전달된다.

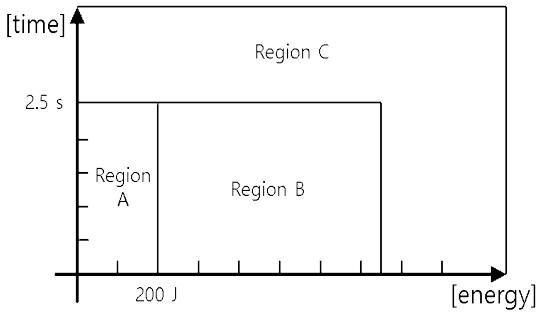


Fig. 1. Arc energy region of UL1699B: photovoltaic DC arc fault circuit protection [7]

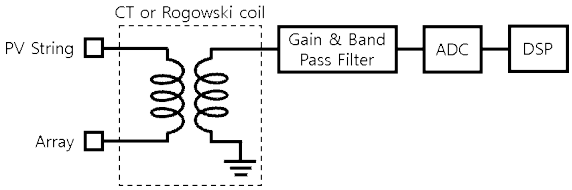


Fig. 2. Simplified structure of the used series arc fault detection system

2.2 직렬 아크 사고 시스템의 아크 신호 주파수 특성

직렬 아크 신호의 주파수 성분은 수 MHz 대역의 분포를 갖지만, 태양광 발전 시스템을 구성하는 케이블의 기하학적 구조로부터 200kHz 이상의 아크 신호는 주파수에 따라 신호의 크기가 크게 달라진다[8]. 또한 아크 주파수 성분의 50kHz 미만 영역은 일반적으로 사용되고 있는 태양광 인버터의 스위칭 주파수 노이즈와 간섭이 일어날 수 있다. 이러한 이유로 본 논문의 아크 사고 검출 시스템은 밴드 패스 필터로 아크 신호의 주파수 성분 중 40kHz 에서 100kHz의 신호만 선택적으로 활용한다. 아크 신호의 주파수 성분을 효과적으로 샘플링하기 위해 제안하는 시스템은 TI 사의 SM73201 ADC를 사용하여 200kHz 이상의 샘플링 주파수를 갖도록 설정하였다.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)

3. 직렬 아크 사고 모의실험 결과 및 분석

전류 트랜스포머와 로고스키 코일의 아크 사고 신호 비교를 위해 아크 사고 검출 보드와 모의 아크 사고 발생 회로를 그림 3과 같이 제작하였다.

교류 입력 전압을 정류하여 태양광 패널을 모의하였으며, 나이프 스위치를 오픈시킴으로써 임의의 아크 사고에 대한 신호들을 측정하였다. 측정 장비들의 사양은 표 1과 같다.

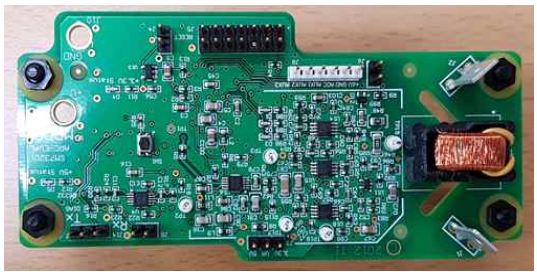
Table 1. Instrument for Measurement

Measurement Equipment	Manufacturer	Specification
Oscilloscope (DLM2024)	Yokogawa	DC - 200MHz
Differential Probe (700924)	Yokogawa	DC - 100MHz 1400V
Voltage Probe (701938)	Yokogawa	DC - 200MHz 600V
Current Probe (701933)	Yokogawa	DC - 50MHz 30Arms
Current Probe (8590C)	Pearson Electronics	1kHz - 150MHz 5Arms

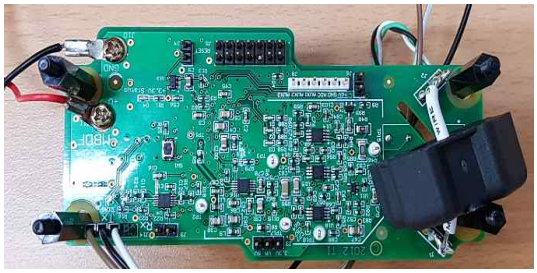
3.1 전류 트랜스포머의 직렬 아크 사고 실험 결과 및 분석

전류 트랜스포머는 1:100 턴수비를 갖는 Pulse 사의 PA3655NL을 사용하였고 50kHz 에서 500kHz의 주파수 측정 범위를 갖는다. 해당 전류 센서를 활용하여 300V에서 3A, 2A, 1A 전압 전류 조건의 모의 아크를 발생시키고 전압과 전류를 측정하였다.

그림 4의 실험 파형은 각각의 전압 전류 조건에서 나이프 스위치 양단 전압, 도통 전류, 도통 전류의 AC 성분, 전류 트랜스포머의 측정 전압을 나타낸다. 그림 4 (a)에서 아크 사고가 발생하는 순간 스위치 양단 전압이 증가하기 시작하고 이와 동시에 도통 전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 직렬 아크 사고의 경우



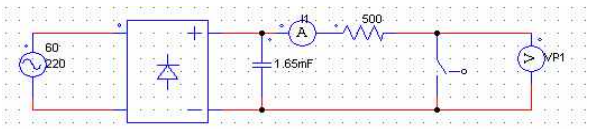
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Photos of the developed series arc fault system and circuit (a) developed series arc fault evaluation board with a current transformer (b) developed series arc fault evaluation board with a rogowski coil (c) test bed of mock arc fault (d) circuit of the test bed

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)

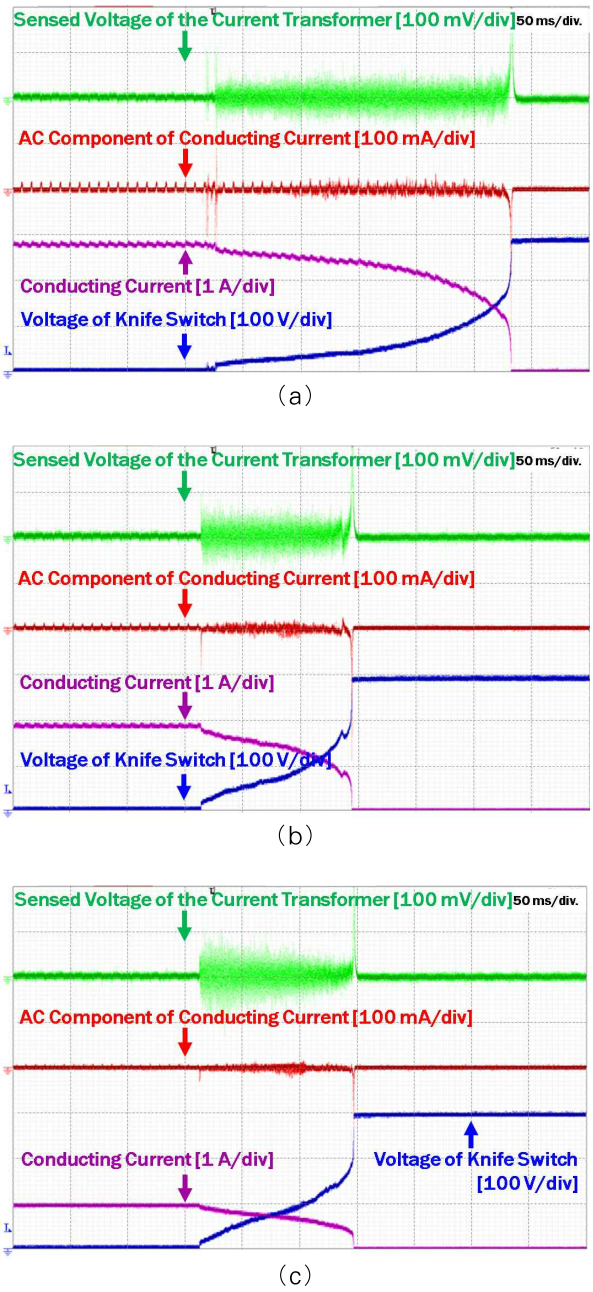


Fig. 4. Experimental waveforms of using a current transformer (a) 300V, 3A (b) 300V, 2A (c) 300V, 1A

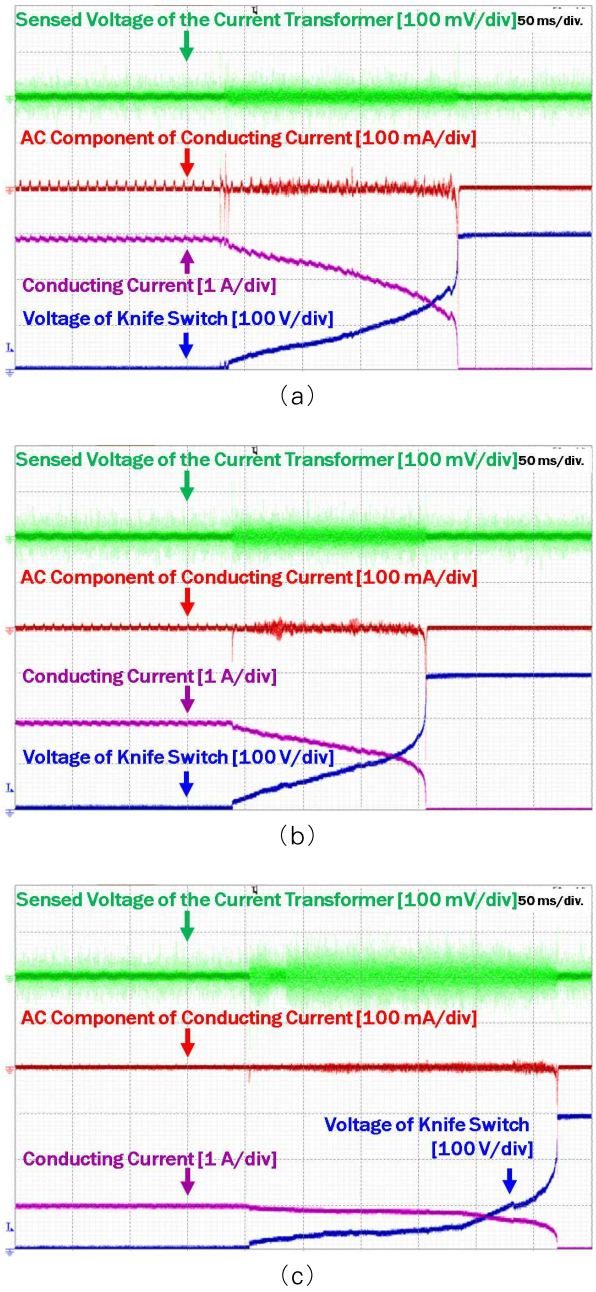


Fig. 5. Experimental waveforms of using a rogowski coil (a) 300V, 3A (b) 300V, 2A (c) 300V, 1A

회로에 임피던스가 증가하는 형태로 표현되는 것을 보여준다. 이후 아크가 완전히 소호 될 때까지 전류는 지속적으로 감소하며, 그 과정에서 도통 전류의 AC 성분은 전류 트랜스포머를 거쳐 전압 신호로 바뀌게 된다. 그 결과 전류 트랜스포머의 측정 전압은 아크 사고 발생 순간을 기점으로 나눌 수 있다. 그림 4 (b)

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)

와 (c)에서도 아크 발생 후 주파수 신호가 전류 트랜스포머의 출력 전압에 측정되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전류 트랜스포머의 측정 전압을 활용하여 주파수 특성을 분석한다면 아크 사고 발생 여부의 판단이 가능하다.

3.2 로고스키 코일의 직렬 아크 사고 실험 결과 및 분석

사용한 로고스키 코일은 Pulse 사의 PA3208NL로 최대 500kHz의 주파수 측정 범위를 갖는다. 앞서 언급한 전류 트랜스포머와의 아크 사고 측정 전압을 비교하기 위해서 동일한 전압 전류 조건에서 임의 아크를 발생시켰다. 그림 5의 300V 전압 조건에서 3A, 2A, 1A의 다양한 전류 상황을 모의하여 임의 아크를 발생시켰음을 확인할 수 있다.

전류 트랜스포머를 활용한 경우와 마찬가지로 임의 아크 사고를 발생시킨 순간에서부터 나이프 스위치의 양단 전압은 상승하고, 도통 전류는 감소한다. 또한 도통 전류의 교류 성분은 아크가 발생한 순간 증가하기 때문에 로고스키 코일의 아크 사고 신호 측정 결과도 동일한 파형을 얻는다.

두 실험결과를 토대로 모의 아크 사고 발생을 측정한 전압 파형은 전류 트랜스포머나 로고스키 코일 중 어떠한 전류 센서를 사용하여도 모의 아크 신호의 주파수 성분을 측정 가능함을 보여준다. 나아가, 전류 센서의 측정 전압 결과로부터 아크 사고 발생 시 아크의 주파수 성분을 분석하여 아크 사고 여부를 판단하기 위한 검출 알고리즘으로 활용 가능함을 보여준다.

모의한 DC 직렬 아크 사고 실험의 전류 프랜스포머와 로고스키 코일의 측정 결과를 표 2로 비교하였다. 로고스키 코일을 사용하는 경우 측정 전압의 크기가 전류 트랜스포머보다 30mV 정도 감소하였으나, 두 측정 방법 모두 직렬 아크 사고의 주파수 정보를 표현 가능하므로 DC 직렬 아크 사고 검출에 이용 가능하다. 또한 측정 된 전압은 도통 전류의 방향과 무관하게 아크 사고 주파수 성분을 출력하는 것을 보여준다.

Table 2. Comparison of the Current Transformer and Rogowski Coil Measured Results

	Current Transformer	Rogowski Coil
Sensed Voltage Level	20~60mV	20~30mV
Sensed Voltage Frequency	0~100kHz	
Sensed Voltage Polarity	Bidirectional	

3.3 아크 사고 신호의 ADC 샘플링 분석

전류 센서로 측정 된 모의 아크 신호들은 238kSPS로 1024개의 샘플링 데이터로 DSP 메모리에 저장된다. 그림 6은 아크 발생 순간의 2000개 샘플링 신호이며 8.4mS의 시간-전압 그래프로 해석된다.

그림 6의 아크가 발생하지 않은 경우 ADC 측정 전압은 레퍼런스 전압으로 균일하지만, 아크가 발생한 경우에는 ADC 측정 전압에 수 십 kHz의 주파수 성분이 샘플링 된다. 따라서 전류 센서를 통한 아크의 측정 신호는 DSP를 활용한 입력 신호의 주파수 분석으로부터 아크 사고 발생 유무를 판단하는 하나의 척도로 사용될 수 있다.

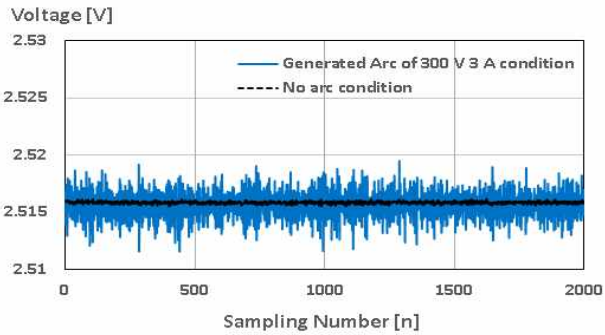


Fig. 6. ADC sampling result of the generated 300V 3A arc signal with using the rogowski coil

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)

4. 결 론

본 논문은 중대용량 태양광 발전 시스템의 직렬 아크 사고 발생 검출을 위한 기초 실험으로 로고스키 코일의 적용 가능성을 연구하였다. 전류 트랜스포머와 로고스키 코일 두 개의 전류 센서가 직렬 아크 사고 발생 검출 실험에 사용되었으며, 각 센서의 측정 전압을 비교하였다. 그 결과 다양한 전류 전압 조건의 아크 사고 모의실험을 통해 전류 트랜스포머와 로고스키 코일의 측정 전압 모두 수십 kHz의 직렬 아크 주파수 성분을 포함하는 것을 확인하였다. 따라서 대용량 태양광 발전 시스템의 직렬 아크 사고 검출 시스템에 로고스키 코일을 적용하여 전류 트랜스포머의 전류 용량 측정 한계를 극복하고, 로고스키 코일의 출력 신호를 분석해 직렬 아크 사고의 발생 유무 판별 가능성을 보여준다.

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] 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, 2014.
[2] Pan Qi, Jinmi Lezama, Slavisa Jovanovic, Patrick Schweitzer, Adaptive real-time DWT-based method for arc fault detection, The 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, Germany, pp. 563-568, 2014.
[3] Rory David Telford, Stuart Galloway, Bruce Stephen, and Ian Elders, Diagnosis of Series DC Arc Faults—A Machine Learning Approach, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 4, pp. 1598-1690, Nov. 2016.
[4] Abdillah Fashiha Ilman, and Dzulkiflih, Low Voltage Series Arc Fault Detecting With Discrete Wavelet Transform, 2018 International Conference on Applied Engineering (ICAE), Batam, Indonesia, pp. 1-5, 2018.
[5] Hezi Zhu, Zhan Wang, and Robert S. Balog, Real Time Arc Fault Detection in PV Systems Using Wavelet Decomposition, 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, USA, pp. 1761-1766, 2016.
[6] 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, 2016.
[7] Underwriters Laboratories (UL) Subject 1699B, Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection, October 31, 2014.
[8] Texas Instruments Incorporated, Application Report: AN-2154 RD-195 DC Arc Detection Evaluation Board, 2012.

Biography



Chan-Gi Cho

Chan-Gi Cho received the B.S. degree in information display engineering from Kyung-Hee University, Seoul, South Korea, in 2016, and the M.S. in energy system from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2018. He is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include resonant converters, high-voltage pulse power system, photovoltaic inverter, and DC series arc fault detection.



Jae-Beom Ahn

Jae-Beom Ahn 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-Han Lee

Jin-Han Lee 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.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)



Yong-Joo Kim

Yong-Joo Kim 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 PhD 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

Hong-Je Ryoo (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.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/07/29 10:14(KST)