

태양광발전설비 DC 아크특성 분석

김완수^{1)*} · 박광묵²⁾

¹⁾한국전기안전공사, 전북, 56212

²⁾한국전기안전공사, 전북, 55365

DC Arc Characteristics Analysis according to U1699B Test Standard of the Status

Wan-Su Kim^{1)*} · Kwang-Muk Park²⁾

¹⁾Korea Electrical Safety Corporation, Jeonbuk, 56212, Korea

²⁾Korea Electrical Safety Corporation, Jeonbuk, 55368, Korea

Received October 21, 2023; Revised November 30, 2023; Accepted December 1, 2023

ABSTRACT: The main cause of solar facility fires is arc, and in the last 3 years ('16 to '18), about 80% of domestic solar facility fires have been caused by arcs. The capacity of solar power facilities installed around the world continues to increase, and fires caused by arcs are also expected to increase as the solar power generation facilities that were initially installed become obsolete. In this paper, an arc generation test was conducted based on the UL1699B test standard. As a result of the test, the arc generation satisfied the minimum arc current according to the test conditions, and DC arc characteristics were analyzed through data such as arc voltage and arc current according to variables such as speed of moving electrodes and electrode spacing.

Key words: 80% of domestic solar facility fires, arc generation, DC arc characteristics

1. 서론

태양광설비 화재의 주요 원인은 아크로써 최근 3년('16~'18) 간 국내 태양광설비 화재의 약 80%가 아크에 의해 발생되었다. 전 세계에 설치되고 있는 태양광설비의 용량은 계속 증가하고 있으며, 초기에 설치되었던 태양광발전설비가 노후함에 따라 아크에 의한 화재 또한 증가할 것으로 예상된다. 산업화의 진전과 생활수준의 향상에 따라 깨끗하고 편리한 에너지인 전기 에너지의 수요는 날로 증대되고 있어, 매년 8-9%의 높은 증가율이 예상되고 있다. 이러한 전력수요의 급증에 대비한 전력공급의 확보와 함께 다양화된 전기설비의 안전성에 대한 고객 요구 등이 대두됨에 따라 전기설비의 안전 분야에 대한 기술개발의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 미국에서는 태양광설비에서 아크 화재로 발생하는 피해를 줄이기 위해 '11년 NEC를 개정하여 690.11에 따라 80 V 이상 태양광설비에 AFCI를 요구하고 있다. UL에서는 '13년 DC AFCI 시험표준인 UL1699B 초안(Draft)을 발행하여 특정 시간 내에 아크를 감지하도록 요구하

였으며, '18년 8월에 UL1699B 초판(First Edition)이 발행되었다. UL1699B('18)는 UL1699B('13)에 비교하여 시험조건 및 적합기준, 아크발생장치의 형태 등이 변경되었으며, 아크 발생 방법 및 구동방식에서 보다 정교함을 요구하고 있다.

본 논문에서는 UL1699B('18) 시험표준을 기반으로 아크 발생 실험을 실시하였으며, 이동전극 속도, 전극간격 등의 변수에 따른 아크 전압, 아크 전류 등의 데이터를 통해 DC 아크 특성을 분석하였다(Fig. 1).

2. 본론

2.1 UL1699B 시험조건

UL1699B('13)는 300 W, 500 W, 650 W, 900 W의 아크 발생을 시험조건으로 시험을 진행한다. Table 1은 UL1699B('13)에서 아크발생 시의 아크전류, 아크전압, 아크전력 수치를 나타낸 것으로 아크 발생을 위한 시험전류 및 시험전압은 규정하고 있지 않다. 반면 UL1699B('18)는 Table 2와 같이 시험조건을 구체적으로 제시하고 있다. UL1699B('18)에서는 아크 발생을 위한 시험전류 및 시험전압, 전극간격과 이동전극의 속도를 규정

*Corresponding author: kwsu@kesco.or.kr



Solar module foreground Solar module connection box

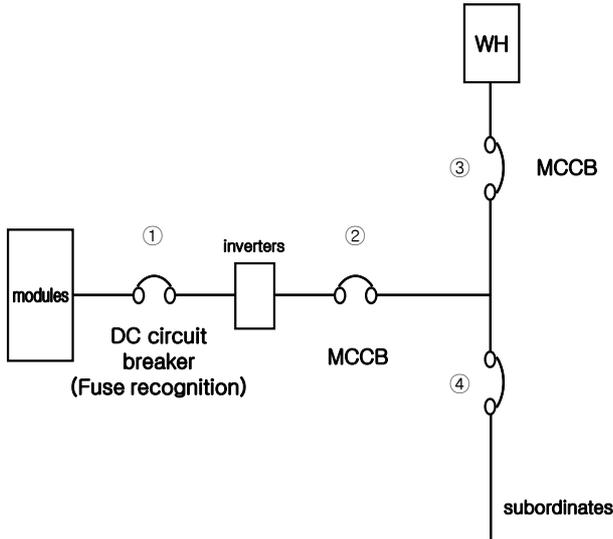


Fig. 1. Installation of solar power equipment breakers, etc.

하고 있으며, 시험전류 및 시험전압에 따른 아크 발생 시의 최소 아크전류를 만족해야 한다.

UL1699B의 변경사항에서 가장 큰 특징은 전극간격과 이동 전극의 속도를 수치화한 것이다. 아크의 전압 및 전류 특성은 전극의 물성 및 전극간격에 영향을 받는다. 만약 DC 아크발생장치에서 구리전극을 사용하고 이동전극의 속도를 동일하게 적용한다고 가정하면 전극간격이 아크 특성을 변화시키는 유일한 변수가 된다.

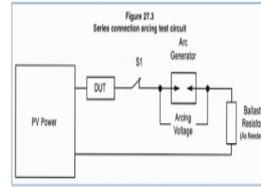
2.1.1 UL1699B 시험표준 분석을 통한 DC AFD 성능 평가 지표

1) UL1699B 2013, 2018 버전 비교

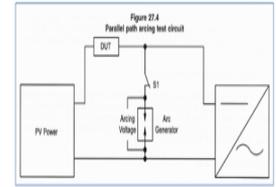
UL1699B 2013년 버전과 2018년 버전을 비교해보면 몇 가지 차이점을 발견할 수 있다. 첫 번째는 2013년 버전에는 직렬아크 시험 및 병렬아크시험에 관한 시험회로가 있었으나, 2018년 버전에는 병렬아크시험이 삭제되고, 직렬아크시험에 관해서만 발행되었다.

UL1699B 2013년 버전과 2018년 버전을 비교해보면 몇 가지 차이점을 발견할 수 있다. 첫 번째는 2013년 버전에는 직렬아크 시험 및 병렬아크시험에 관한 시험회로가 있었으나, 2018년 버전에는 병렬아크시험이 삭제되고, 직렬아크시험에 관해서만 발행되었다. 병렬아크시험 시험코드는 병렬아크 구현 기술에 대한 더 많은 연구와 추가개발이 필요한 상황이다. 특히 대형 시스템의 경우 안전을 고려하여 할 사항들이 충분히 준비될 필요가 있다(Fig. 2).

▶ UL 1699B - 2013

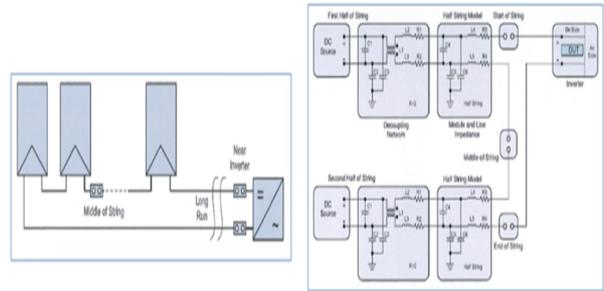


Series Arc-Faults



Parallel Arc-Faults

▶ UL 1699B Ed.1 - 2018



Series Arc-Faults

Fig. 2. UL1699B Arc detection test comparison

태양광 발전설비에서 절연불량에 의한 단락이 발생하더라도 태양광 발전설비 특성상 단락전류가 낮기 때문에 병렬아크를 평상시 정상적인 회로에서 발생하는 직렬아크와 비교에서 아크 전류 크기의 차이가 거의 없다. 또한 태양광 발전설비에서 아크 검출장치가 단락 발생지점 후단에 설치되어 있을 경우 전류가 아크검출장치로 흐르지 않기 때문에 아크검출에 문제가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Table 1은 태양광 발전설비 특정 스트링단에서 단락을 발생시키고 각각의 스트링 단과 어레이 단에서 전압 및 전류를 측정할 실험 데이터를 나타낸 것이다. 정상적인 상태에서의 전류 크기와 ST#2에서 단락을 발생시켰을 때의 전류 크기의 차

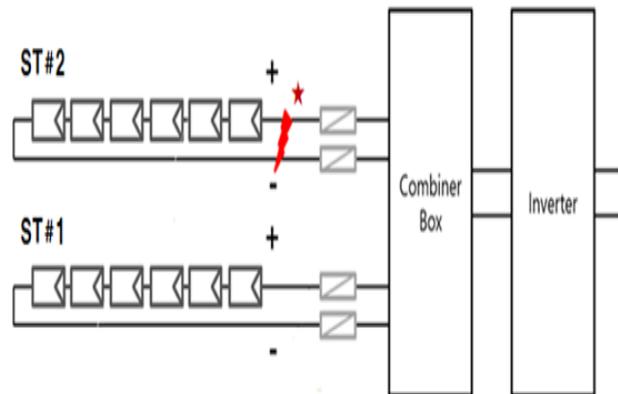


Fig. 3. String short circuit test

Table 1. String short circuit test (reference value)

Statuses	Stance	Voltages			Currents		
		ST#1	ST#2	Array	ST#1	ST#2	Array
Normalcy	-	360	360	360	2.5	2.3	4.8
Paragraph	★	365	0.3	365	2.7	2.6	2.7

이가 거의 없고, 단락 발생지점 이후인 어레이 단에는 ST#1 회로에서 흐르는 전류량만 측정된 것을 알 수 있다.

두 번째는 2013년 버전 시험조건에서는 전류, 전압, 용량만 주어졌으나, 2018년 버전에서는 I_{mp} , V_{mp} 와 같이 태양광 MPPT에 대한 내용이 포함되어 있다.

2013년 버전에서는 아크검출시험이 일반적인 단방향 DC Power Supply로는 구현이 가능했으나, 2018년 버전에서는 I_{mp} , V_{mp} 에서 아크를 발생시켜 시험을 실시한다. UL1699B 24.4절에는 시험을 위한 DC 전원에 대한 내용이 언급되어 있다.

시험에 쓰이는 전원은 실제 태양광 어레이를 사용하거나 태양광 어레이 특성 시뮬레이션이 가능한 DC 전원공급 장치가 요구되어진다.

2013년 개최된 UL STP (Standards Technical Panel) 미팅에서는 태양광의 V-I 특성 및 임피던스 구현 문제를 해결하기 위한

태양광 시뮬레이션 DC 전원공급 장치가 주요 주제였다. 또한 회로 구성을 위한 저항, 커패시터 등의 파라미터에 대한 내용이 다루어졌다. 그 결과 2018년 버전에서는 Fig. 5와 같이 DC Power Supply에 코일을 사용하여 유도성 전류를 커플링 시키는 부분인 Decoupling Network와 회로 임피던스를 연결하여 전원을 공급함으로써 태양광 V-I 특성 구현이 가능해졌다.

세 번째 차이점은 아크발생장치이다. Fig. 6의 2013년 버전에서는 아크발생장치에 Tube 와 Steel Wool이 포함되어 있었으나, Fig. 7의 2018년 버전에서는 삭제되었다. 실제로 도전성 가연물을 매개로 아크를 발생시키면 시험마다 동일한 결과물을 얻기가 쉽지 않다. 그래서 2018년 버전에서는 UL1699 AC 시험

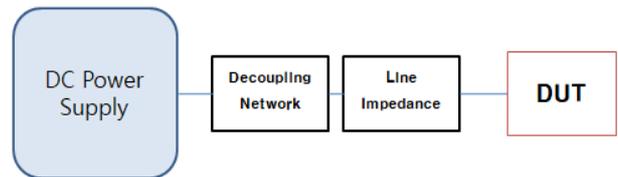


Fig. 5. IEC 63027 ED1 to be published in '20

UL 1699B - 2013

Arcing current (amps) ^a	Arcing voltage ^b (volts)	Average Arcing Watts ^c	Approximate electrode, inches (mm) ^b	Max time (sec) ^c
7	43	300	1/16 (1.6)	2
7	71	500	3/16 (4.8)	1.5
14	46	650	1/8 (3.2)	1.2
14	64	900	1/4 (6.4)	0.8

Note: Arcing current may be reduced, while still achieving average Watts, where arcing current exceeds rated current of the device.
^a ±20% for arcing current, ±10% for average arcing Watts.
^b Approximate, as needed to achieve arcing Watts. Electrode gap can be adjusted to achieve needed arcing voltage.
^c Based on average Watts. See 27.3.11(a) for actual maximum detection or interruption times.
^d For devices rated less than arcing current, test current may be reduced to rated current and arcing watts calculated accordingly.

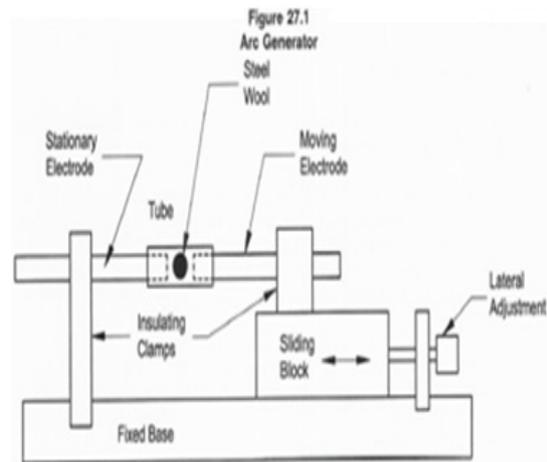


Fig. 6. 2013 version arc generator

UL 1699B Ed.1 - 2018

Test no.	Minimum I_{arc} (A) ^a	I_{mp} (A)	Sep. rate (mm/s)	V_{mp} (V) ^b	V_{oc} (V) ^b	F_{max} (ohms) ^b	Gap (mm)
1	2.5	3.0	2.5	312.0	480.0	56.0	0.8
2	7.0	8.0	5.0	318.0	490.0	21.0	0.8
3 ^d	14.0	16.0	5.0	318.0	490.0	11.0	1.1
4	7.0	8.5	5.0	607.0	810.0	24.0	2.5

^a I_{arc} values in Table 29.2 are representative of realistic arc events with one or two strings at full and low irradiance. It is expected that the AFCI shall meet compliance criteria below at intermediate current levels also.
^b These values are approximate.
^c Required for arcs in series with two parallel strings.

Fig. 4. UL1699B test condition comparison

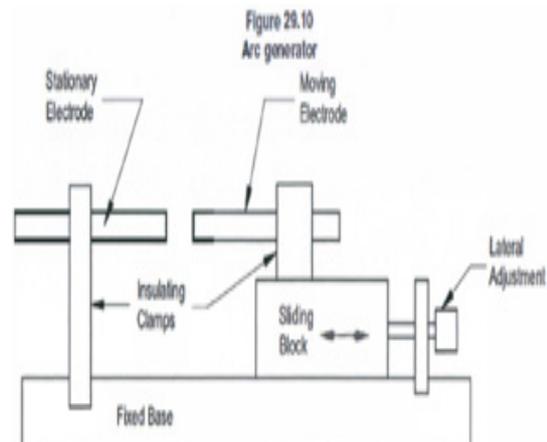


Fig. 7. 2018 version arc generator

표준과 동일하게 중간 매개물 없이 전극의 간격을 조정하면서 시험을 실시한다.

2) DC AFD 성능평가 지표

UL1699B 아크검출시험의 적합기준은 아크발생시의 열에너지 750J이다. 전극 간격이 주어졌을 때 아크지속시간, 전압, 전류를 측정하여 아크의 열에너지를 산출한다.

Fig. 8은 아크에 의한 열에너지 범위를 나타내고 있다. A부분은 아크 지속시간이 2.5 미만으로 열에너지 200 J을 초과하지 않는다. B부분은 아크 지속시간이 2.5 미만으로 열에너지 750 J을 초과하지 않는다. C부분은 아크 지속시간이 2.5초 이상으로 열에너지 750 J보다 크며, 아크에 의해 가연물 착화 확률이 높은 영역이다.

2.5초는 착화를 위한 최대시간을 의미한다.

DC AFD 성능평가 적합에 대한 지표는 아크발생장치로 아크 발생 시 아크전압, 아크전류를 측정하여 아크 열에너지를 산출했을 때의 값이 750 J 이하인 것으로 한다.

Development of arc-fault circuit-interrupter requirement for photovolt systems 2011년, IEEE 논문에 의하면 아크의 에너지가 750 J 이하일 시점에 아크를 차단하면 아크에 의한 화재 발생 확률은 5% 이하이다. 이를 바탕으로 UL1699B에서는 아크발생 시 750 J 이내에 차단하는 것을 아크검출장치의 적합기준으로 제시하고 있다. (1)에서 T_{trip} 은 UL1699B에 의해 요구되는 사고 검출시간, I_{arc} 는 아크사고 전류, V_{arc} 는 아크사고 전압이다.

$$T_{trip} = \min(2, \frac{750}{I_{arc} \cdot V_{arc}}) \tag{1}$$

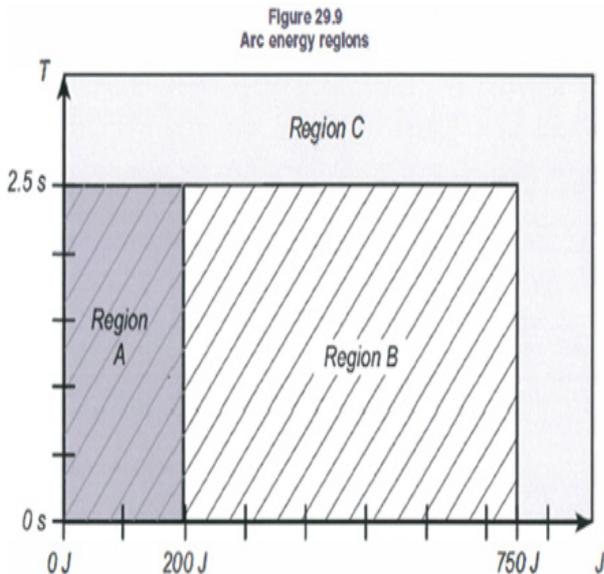


Fig. 8. Arc energy range

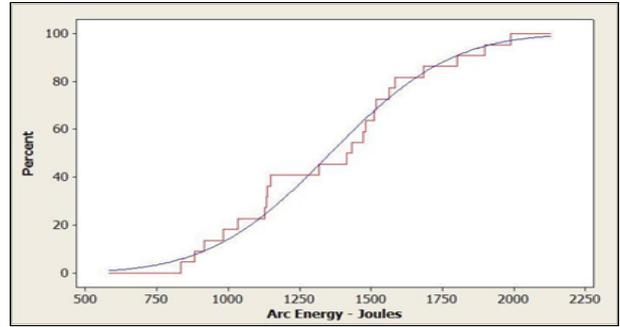


Fig. 9. Fire incidence rate due to accumulated arc energy

Reference <표 1> UL1699B (2013), arc test conditions

Arcing current (A)	Arcing voltage (V)	Arcing Watts (W)
7	43	300
7	71	500
14	46	650
14	64	900

Reference <표 2> UL1699B (2018), arc test conditions

Minimum I_{arc} (A)	I (A)	V (V)	Sep.rate (mm/s)	Gap (mm)
2.5	3.0	312.0	2.5	0.8
7.0	8.0	318.0	5.0	0.8
7.0	8.5	607.0	5.0	2.5

Fig. 9는 아크발생시 누적된 아크에너지에 따른 화재 발생률을 나타내고 있고 <표 1, 2>는 시험조건이다. 빨간 실선은 80회 실험한 결과에서 도출된 발화 확률을 의미하며, 파란 실선은 실험결과를 함수로 근사화한 결과이다.

2.2 아크 발생 실험

2.2.1 실험방법(직접실험장소: 연구실)

Fig. 10과 같이 아크발생실험 세트를 구성하였다. 실험 세트는 직류전원, 아크발생장치, 저항부하, DC 아크 발생에 따른 전압 전류를 측정하기 위한 오실로스코프로 이루어진다. 직류전원은 ET System 社의 LAB HP 101000 (10 kW, 1000 V-10 A)을

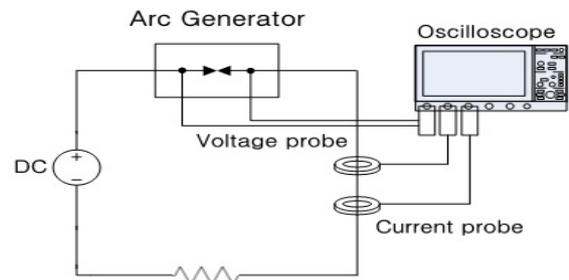


Fig. 10. Direct arc generation test configuration

이용하였다. 오실로스코프는 LeCroy 社의 WaveRunner 610Zi (1 GHz, 4채널, 20 GS/s)를 사용하였다. 전압센서는 (ADP305, 1000 V, 100 MHz), 전류센서는 (CP030 A, 30 A, 50 MHz)을 사용하였다. 전류센서는 두 개를 사용하여 DC 성분과 AC 성분을 함께 측정하였다. 데이터는 100 kS/s 샘플링으로 1초간 취득하였다.

실험은 Table 3과 같이 UL1699B(‘18)을 기반으로 한다. 먼저 Table 3의 실험조건 1을 통해 UL1699B 시험조건에 따른 최소아크전류를 만족하는지 확인한다. 실험조건 2를 통해서 전극간격, 전압, 전류 등 변수 간 관계를 통해 DC 아크 특성을 도출한다.

2.2.2 실험결과(단락실험)

Fig. 11은 Table 3의 실험조건 1 전압 312 V, 전류 3 A, 전극속도 2.5 m/s, 전극간격 0.8 mm 아크 발생 시의 상황을 나타낸 것이며, Fig. 12는 동일한 조건에서 획득한 파형을 나타낸 것이다. I_{arc-1} 는 아크가 생성된 전로에 흐르는 전류, I_{arc-2} 는 I_{arc-1} 의 AC

Table 3. Test conditions

No.	I (A)	V (V)	Sep.rate (mm/s)	Gap (mm)
1	3.0	312.0	2.5	0.8
2	1~5	312.0	2.5	0.8~4.0

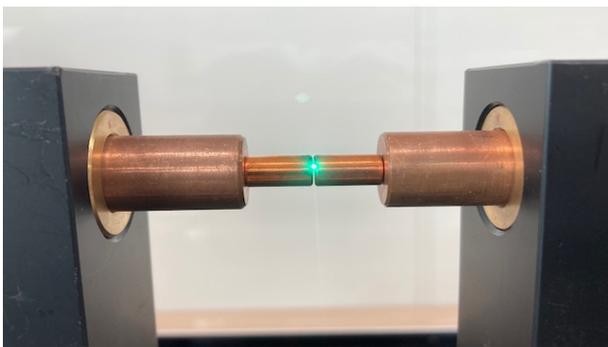


Fig. 11. Arc generation

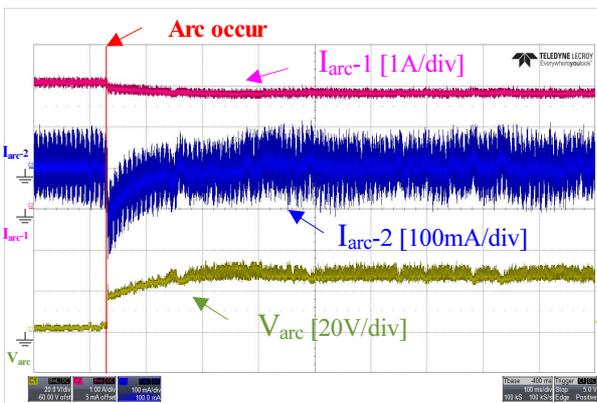


Fig. 12. Arc generation test waveform

성분, V_{arc} 는 전극 양단에 걸리는 아크 전압을 나타낸다. 조건에 따라 측정된 최소아크전류는 2.59 A로 UL1699B(‘18) 시험조건인 최소아크전류인 2.5A를 만족시켰다. 아크전압 최대치는 34.8 V, 아크전류 AC 성분의 파고-파고(Peak to Peak) 값은 335 mA로 나타났다.

DC 아크 특성 분석은 아크 발생 시간 동안 얻어진 아크 전압 V_{arc} , 아크 전류 I_{arc} 데이터의 평균값을 취하여 변수 간 관계를 도출한다. Fig. 13과 Fig. 14는 Table 3의 실험조건 2에 따라 측정된 데이터를 통해 얻어진 결과이다. Fig. 13은 전극간격 및 전류 변화에 따른 아크 저항의 변화를 나타낸다. 아크 저항은 낮은 전류에서 높고, 전극간격이 증가함에 따라 함께 증가한다. 실험 결과를 통해 아크저항은 낮은 전류범위 및 전극간격에 영향을 받을 수 있다. Fig. 14는 전극간격을 0.8 mm에서 4.0 mm로 단계적으로 변화시켰을 때 아크 전압과 아크 전류의 관계를 나타낸다. 실험에서 아크 전류가 증가함에 따라 아크 전압은 감소하며, 아크의 전극간격이 증가함에 따라 전극 양단에 걸리는 전압이 증가한다. 이러한 현상은 아크 전류가 증가함에 따라 아크가 안정화되어 아크의 플라즈마 영역의 전기적 저항이 감소하고, 아크 저항 감소에 따라 전극 양단의 전압이 감소하는 것으로 판단된다.

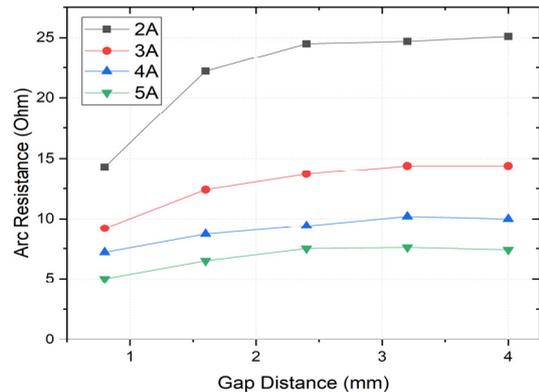


Fig. 13. Changes in arc resistance due to electrode spacing and current

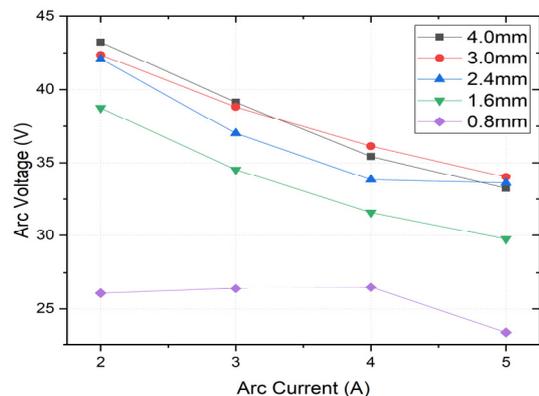


Fig. 14. Relationship between arc voltage and current due to changes in electrode spacing

Reference <표 3> Installation status of ESS for the connection of solar power generation facilities (As of May 2017)

Num.	Plant name	Solar capacity (KW)	ESS capacity (kWh)
1	ES solar	1,423	3,328
2	Konkuk University solar power generation	100	365
3	Gridsol solar power generation	2,034	1,065
4	Green6 solar energy	499	1,498
5	Sama Energy Co., Ltd. solar energy	397	1,331
6	DC Energy Co., Ltd.	1,490	3,661

※ Source of data : Korea Electrical Safety Cooperation

3. 결론

본 논문은 UL1699B(‘18)태양광전용기준이며, 발전상태를 가정하여 직접 직렬아크실험 시험표준(0.8 mm)을 기반으로 아크 발생 실험을 실시하였다(환경조건으로는 실내 온도 25도, 습도 60%). 실험결과 아크 발생은 UL1699B 시험조건에 따른 최소아크전류를 만족하였으며, 전극간격 등의 변수에 따른 아크 전압, 아크 전류 등의 데이터를 통해 DC 아크 특성을 분석하였다. 아크 전류가 증가함에 따라 아크 전압은 감소하였으며, 아크의 전극간격이 증가함에 따라 전극 양단에 걸리는 전압은 증가하였다. 이러한 현상은 아크 전류가 증가함에 따라 아크가 안정화되어 아크의 플라즈마 영역의 전기적 저항이 감소하고, 아크 저항 감소에 따라 전극 양단의 전압이 감소하는 것으로 판단된다.

추후, DC 전압의 범위가 750 V에서 1500 V로 상승시작화시간이 짧아 사고가 클것으로 큰차이 발생 할 수 있고, 더 나아가서 <표 3>연계설비(ESS)도 같이 연구가 필요하다. 참고로 사고과급과 관련하여 태양광 발전설비는 고정 발전원이라는 특성상 타 발전설비에 비해 사고 발생비율이 낮고 대부분 도심지에서 떨어진 오지, 산간 등에 설치되어 대형화재로 확대될 가능성이

낮아 사고 발생 시에도 소유자 설비에 국한한 피해가 발생할 것으로 판단된다. 또한, 전력계통으로의 파급사고 예방과 관련하여 발전설비에 대한 계측데이터 모니터링뿐만 아니라 사고 발생 시(저전압, 과전압, 지락 등) 계통에서 분리시키기 위한 사고 차단기능 설치를 의무화할 경우 전력계통으로의 파급사고를 미연에 예방할 수 있을 것으로 판단된다.(「분산형전원 배전계통 연계기술 기준」 제11조에 따라 한전계통에 연계되는 경우 전압 전류 감시 기능, 고장 표시 및 자동차단 기능 등을 구비한 분리장치 설치토록 규정)

References

1. Alarn, M. K., Khan, F., Johnson, J. and Flicker, J., "A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Array," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 5, no. 3, pp. 982-997 (2015).
2. Park, K. M., Park, J. Y., Hong, S. J., Bang, S. B. and Lee, S. Y., "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).
3. J. J. Shea, "Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits," Fire and Materials, vol. 35, no. 1, pp. 19-42 (2011).
4. "National Electrical Code," NFPA70, Article 690, "Solar Photovoltaic System," National Fire Protection Association (2014).
5. "UL1699B-Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection," Underwriters Laboratories (2013).
6. "UL1699B-Standard for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection," Underwriters Laboratories (2018).
7. Nottingham, W. B. "Normal arc characteristic curves: dependence on absolute temperature of anode," Phys. Rec., vol. 28, no. 4, pp. 764-768 (1926).
8. Korea Electrical Safety Corporation DB, 2020-2023.
9. Energy Storage System by Infothebooks 85-115 (2014).
10. Status of solar power plant accidents issued by Korea Electric Safety Corporation 2012-2016.
11. Status of accidents by facility issued by Korea Electric Safety Corporation 2012-2016.