

## BIPV 시스템의 안전성 향상을 위한 보호시스템 구성 및 특성 분석

### Characteristic Analysis and Configuration of the Protection System to Improve the Safety of the BIPV System

조석환<sup>1</sup>, 고재섭<sup>2</sup>, 김대경<sup>3\*</sup>

Seok-Hwan Cho<sup>1</sup>, Jae-Sub Ko<sup>2</sup>, Dae-Kyong Kim<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper presents the configuration and characteristic analysis of the protection system to improve the safety of the building integrated photovoltaic(BIPV) system. BIPV is a solar power system installed in buildings. Since the BIPV system is installed in buildings, there is a high risk of electric shock and fire accidents. Therefore, in order to improve the safety of BIPV, a protective system is required to block or quickly detect risk factors. In this paper, as a protection system to improve the safety of the BIPV system, it is composed of a rapid shutdown (RSD) that can quickly separate the PV system to prevent fire and electric shock accidents and a system to detect Arc faults that cause PV system fires. RSD and Arc Fault Detector analyzed the operating characteristics according to each condition and confirmed that the safety of the BIPV system can be improved through this.

*Keywords : BIPV, Protection System, Safety, Rapid Shutdown, Arc Fault*

---

1 (주)티엠씨솔루션즈, 대표  
2 국립순천대학교 스마트에너지연구소 팀장  
3\* 정회원, 교신저자, 국립순천대학교, 교수  
E-mail: dkkim@scnu.ac.kr

1 TMCS Co., Ltd, CEO  
2 Suncheon National University Smartenergy Institution  
3\* Dept. of Electrical Engineering, Suncheon National University

## 1. 서론

건물일체형태양광 발전(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)은 태양광 에너지로 전기를 생산하여 소비자에게 공급하는 기능과 건물 일체형 태양광 모듈을 건축물 외장재로 사용하는 태양광 발전시스템을 의미한다[1].

PV 시스템에 대한 세계 시장 규모는 코로나19의 영향으로 시장이 주춤하였으나 지속적인 지원과 관심으로 Table 1과 같이 지속해서 성장할 것으로 예상된다[2]. 특히 국내시장의 경우 정부 주도의 장려 정책에 의해 BIPV 시장이 성장할 것으로 예상되며 2020년부터는 신축된 대형 공공건물 전력 소비량의 20% 이상을 신재생 에너지로 사용하도록 의무화하였고, 2025년부터는 민간 건물에도 확대 적용함으로써 도심지역에 지열, 풍력, 연료전지로 이러한 목표를 달성하기 어렵기 때문에 BIPV의 수요가 자연스럽게 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 국내 BIPV 시장은 2020년 1,298억 원에서 연평균 59%씩 증가하여 2023년 5,218억 원에 달할 것으로 예상된다. 특히 BIPV는 별도의 설치 면적이 필요 없어 고층 건물이 많은 국내에 적합한 시스템으로 인식되고 있다[3].

그러나 BIPV에 대한 시장이 확대됨에 따라 시스템의 용량이 증가하고 있으며 인구가 밀집된 도시 근교 및 건물에 설치되어 화재 및 안전관리에

대한 위험성이 높아지고 있다. 특히 PV 시스템에 화재가 발생할 경우 이를 진압하기 위해 물을 분사할 경우 감전의 위험성이 높아져서 이를 대응하는 방안이 필요하다. 또한 PV 시스템에서 발생하는 화재의 원인이 대부분 전기적인 원인이며 특히 아크 고장에 의해 많은 화재가 발생하고 있다[4].

따라서 본 논문에서는 최근 높은 관심 및 성장을 지속하고 있는 BIPV 시스템의 안전성을 높이기 위하여 위험 요소 및 이를 해결하기 위한 방법을 분석하였다. 분석된 결과를 이용하여 BIPV의 안전성 향상을 위한 보호 시스템을 구성하였으며 각각의 성능 시험을 통해 BIPV 시스템을 안전하게 보호할 수 있는 능력을 확인하였다.

## 2. BIPV 시스템 위험 요소

PV 시스템은 태양광을 전기에너지로 변환시키는 PV 모듈, 전기적 접속을 구성하는 접속함, 직류를 교류로 변환하기 위한 인버터, 에너지를 저장하는 시스템 등으로 구성할 수 있다. 이러한 PV 시스템은 RE100과 탄소중립 그리고 제로에너지건축물 의무화 확대에 따라 규모가 확대되고 있다.

BIPV 시스템에서 나타나는 전기적 위험 요소는 다음과 같이 크게 3가지로 나타낼 수 있다[5].

### 2.1 통전 도체로 인한 감전

PV 시스템은 전력을 생산하기 때문에 전류가 인체를 통해 의도하지 않은 경로를 취할 때 감전에 대한 위험이 있다. 인체의 저항은 약 600Ω~1,000Ω으로 알려져 있으며 600Ω을 기준으로 했을 때 120V 전압에 노출될 경우 사람의 신체를 통과하는 전류의 양은 200mA이며, Table 2에 나

Table 1. Global PV System Market Size by Installation Type

설치유형	2020	2021	2022	2023	2024	2025	연평균 성장률 [%]
BIPV	27.8	30.1	34.1	36.9	39.3	41.5	8.3
지면 설치	48.0	51.6	58.2	62.7	66.5	69.9	7.8
부유식 PV	0.8	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	15.4
합계	76.6	82.7	93.4	101	107.3	113.1	8.1

타난 것과 같이 치사량 한계인 100mA의 2배 이상이므로 이러한 사고로부터 작업자를 보호하는 것은 매우 중요하다[6].

Table 2. Effect of Electric Shock by The Magnitude of The Current

전류	감전의 영향
1 mA	전기를 느낄 수 있음
5 mA	상당한 고통을 느낌
10 mA	견디기 어려운 고통
20 mA	자의로 행동 불가능
50 mA	상당히 위험한 상태
100 mA	치명적인 결과 초래

이러한 감전은 일반적으로 커넥터 및 케이블 부식, 느슨한 배선 및 부적절한 접지에 의한 단락으로 발생한다. PV 시스템에서는 PV 모듈, 케이블, 접속함, 인버터 및 접지 도체에서 이러한 사고가 발생할 수 있다.

## 2.2 화재를 유발하는 아크 고장

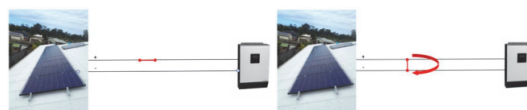
모든 전기 시스템에는 잠재적인 화재 위험이 있다. 전기 시스템에서 발생하는 화재의 가장 큰 원인은 둘 이상의 도체 사이의 고전력 전기 방전인 전기 아크 고장이라고 할 수 있다. 이 방전으로 인한 열로 전선 절연이 열화되어 화재를 일으키는 스파크 또는 아크가 발생할 수 있다. Fig. 1은 아크 고장 및 아크 고장에 의해 발생한 화재를 나타내고 있다.



(a) DC 아크 고장 (b) 아크 폴트로 인한 화재(예시)

Fig. 1 DC Arc Fault and Fire Accident

PV 시스템은 Fig. 2와 같이 접지 오류로 인해 두 도체 사이의 의도하지 않은 전류로 인한 직렬 아크 또는 병렬 아크 고장이 발생할 수 있다.



(a) 직렬 아크 고장 (b) 병렬 아크 고장

Fig. 2 DC Arc Fault Type

특히, PV 시스템과 같은 직류 시스템에서 나타나는 직류 아크는 전류의 영점을 이용하여 자기 소호 능력이 있는 교류 아크와 달리 영점이 존재하지 않기 때문에 강제로 전류를 제한하여 두 접점 사이의 절연을 회복할 수 있도록 해야 한다[7].

Table 3은 최근 5년간 PV 시스템에 발생한 화재를 원인별로 나타내고 있다. PV 시스템에 발생하는 화재의 원인은 전기적, 기계적 및 기타(전기적 및 기계적 이외)로 나눌 수 있으며, 이 중 전기적 요인은 전체의 77%를 차지할 정도로 PV 시스템에 발생하는 화재는 대부분 전기적 원인으로 발생하고 있다.

전기적 요인에 의한 화재 사고를 세분화하면, 절연 결함, 인버터 과열, 접속함 결함 등 설치단가가 상대적으로 낮은 전기 관련 설비·부품에서 화재가 대부분 발생하고 있다.

Table 3. PV System Fire Status(by Fire cause)

구분	계	2019	2020	2021	2022	2023.7
계	378	62	69	81	99	64
전기적 요인	295	49	56	64	72	51
기계적 요인	37	9	4	7	13	4
부주의	10	1	3	1	2	3
자연적 요인	11	0	3	4	2	2
미상	14	2	1	4	5	2
기타	11	1	2	1	5	2

절연 결함은 전선, 패널 등의 부품이 부적절하게 설치되거나 손상되어 전기적인 결함이 발생할 때 나타난다. 전선의 연결 방법, 재료 및 위치가 부적절할 경우 절연 결함이 발생할 수 있다. 또한 전선의 부식 및 패널의 오염이 발생할 경우 전기적 절연 결함이 나타날 수 있다.

PV 시스템은 구조물 - 접속함 - 인버터 - 전기 시설 - 한전 시스템으로 구성된다. 이 중 전기화재는 접속함에서 90% 정도가 발생하고, 그 발생의 근본 원인은 아크이다. 아크의 발생은 0.07초에서 형성이 되고, 0.5초의 아크가 1초 이상의 스파크 현상이 지속되면 전기화재가 발생한다는 점에서 밀폐된 접속함에서 아크 발견은 거의 이뤄질 수 없는 시스템이라 할 수 있다.

### 2.3 폭발로 이어지는 아크 플래시

높은 전압을 가진 대규모 PV 어레이는 아크 플래시에 취약하다. 이는 PV 시스템의 전류를 증가시키기 위해 병렬로 결합되는 접속반의 결함을 검사할 때와 중·고압 개폐 장치 및 변압기를 검사할 때 발생할 수 있다. 아크 플래시는 뜨거운 가스와 집중된 복사 에너지를 방출하여 태양 표면 온도의 최대 4배(~19,500°C)까지 높게 방출된다. 아크 플래시는 400V 이상의 시스템에서 문제가 되므로 일반적으로 최대 입력 전압이 500V인 주거용 인버터와 최대 1,500V인 대규모 인버터 모두 아크 플래시가 발생할 수 있다.

## 3. BIPV 시스템 안전성 향상을 위한 대책

2장에서 나타난 것과 같이 BIPV 시스템에 나타

나는 주요 위험 요소는 크게 감전과 아크 고장으로 볼 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 대책이 요구된다.

### 3.1 통전 도체에 의한 감전 대책

PV 시스템은 일반적으로 PV 모듈을 직렬로 연결하여 높은 전압을 생산하기 위하여 스트링 구조로 사용한다. 따라서 인체 감전 사고에 대한 위험을 줄이기 위해서는 단락 또는 정전 시 이러한 스트링을 차단할 수 있는 방법이 필요하다. 2014년 미국 NEC(National Electrical Code)는 비상시 태양광 발전의 전원을 긴급 차단할 수 있는 RSD(Rapid shutdown)를 처음 소개하였다. 태양광 발전소 화재 시 기계적으로 태양광 시스템의 DC 커넥터를 신속하게 차단해 큰 화재를 막고 태양광 구조물을 진압하는 소방관의 안전을 확보하기 위해 도입되었다.

RSD는 NEC 2017, NEC 2020으로 점차 개선되었으며 NEC 2020에서는 RSD에 대해 다음과 같은 기능을 요구하고 있다.

- 목적에 맞는 PV 위험 제어 시스템의 설치
- 긴급 차단 시작 후 30초 이내에 80V 이하로 제한
- 노출된 배선 방법이나 전도성 부분이 없도록 PV 어레이를 설치하고 노출된 접지 전도성 부분 또는 접지에서 8피트 이상 떨어진 곳에 설치

### 3.2 아크 고장 검출 및 차단

PV 시스템에서 발생하는 DC 아크 고장은 자동으로 소호되지 않고 지속되는 특징을 가지고 있다. 또한 아크 고장은 감전 및 화재 사고를 유발할 수 있으므로 이를 검출하여 차단하기 위한 방

법이 요구되고 있다.

미국에서 태양광 설비의 아크 고장에 따른 위험을 줄이기 위해 2011년 NEC Section 690.11에서는 건물에 설치되는 태양광 발전시스템의 전압이 80V 이상일 경우 PV 소스 및 출력 회로의 아크 고장을 감지하고 차단(AFCI, Arc-Fault Circuit Interrupter)할 수 있도록 다음의 능력을 요구하고 있다.

- 아크 고장이 감지된 후 PV 시스템의 운전을 중지시킬 것
- 시스템은 아크 고장이 감지 되었음을 시각적으로 표시할 것
- 아크 고장 오류를 재설정하고 운전을 재개하기 위해서는 수동으로 시스템을 다시 시작할 것

PV 시스템에서 AFCI 설치를 의무화함에 따라 UL(Underwrites Laboratory)에서는 2013년 DC AFCI 시험표준인 UL1699B 초안을 발생하여 특정 시간 내에 아크를 감지하도록 요구하였으며, 2018년 8월에 UL1699B 초판이 발행되었다. IEC에서도 UL1699B를 기반으로 하는 IEC 63027:2023이 발행되었다.

#### 4. BIPV 안전성 향상을 위한 시스템 구성 및 성능 테스트

본 논문에서는 BIPV 안전성 향상을 위해 RSD와 Arc Fault Detector를 적용하였다.

Fig. 3은 본 논문에 적용한 RSD 성능 테스트를 위한 실험 환경을 나타낸다.

RSD의 성능 테스트는 다음의 3가지 조건에 대하여 실시하였다.

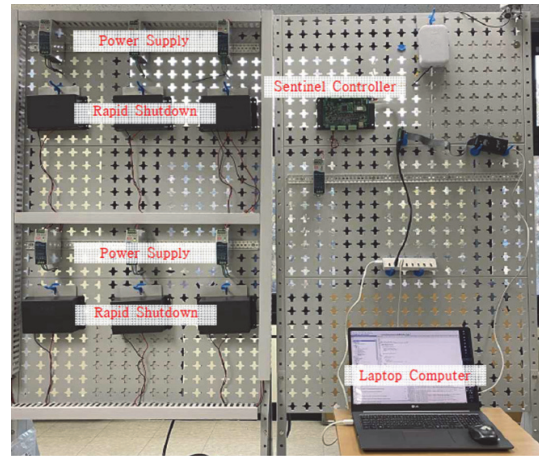
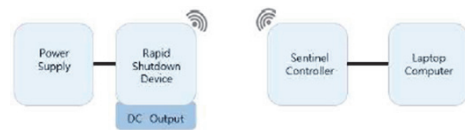


Fig. 3 Test Environment for RSD Performance Testing

##### 4.1 RSD 동작시간

- 시험 장치를 아래의 그림과 같이 구성



- RSD의 DC 출력전압이 Power supply 전압과 유사한지 측정
- 측정된 전압이 정상일 경우 Laptop Computer를 이용하여 Sentinel Controller에 Shutdown 정보 송신 후 시간 측정 시작
- RSD의 출력전압 측정을 통한 Shutdown 상태 확인
- Rapid Shutdown 동작까지 시간 측정

##### 4.2 RSD 동작 이후 스트링 전압

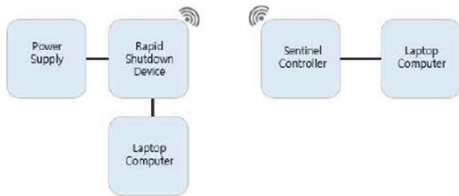
- 시험 장치를 아래의 그림과 같이 구성



- RSD의 DC 출력전압이 Power supply 전압과 유사한지 측정
- 측정된 전압이 정상일 경우 Laptop Computer를 이용하여 Shutdown 진행
- RSD의 DC 출력전압 측정

### 4.3 통신 신뢰성

- 시험 장치를 아래의 그림과 같이 구성



- Sentinel Controller에서 100ms 간격으로 제어 신호 송신 이후 Laptop Computer에서 카운트 출력
- RSD에서 제어 신호 수신 이후 Laptop Computer로 제어 상태와 카운트 출력
- 10,000회 반복 후 Sentinel Controller 출력과 RSD 출력 비교

다음은 RSD에 대한 3가지 성능 테스트 결과를 나타내고 있다.

#### 4.3.1 RSD 동작시간

Laptop Computer를 이용하여 Shutdown 상황을 발생시켰으며, 상황 발생에서 RSD 동작이 종료되는 시점까지 시간을 측정하였다. Table 4는 RSD 작동시간을 나타내고 있다. RSD의 작동시간

Table 4. Rapid Shutdown Operating Time

시험 횟수	RSD 동작시간[sec]
1	0.1
2	0.1
3	0.1

이 0.1[sec]로 NEC 2020의 기준인 30초 이내 동작을 만족하고 있다.

#### 4.3.2 RSD 동작 이후 스트링 전압

RSD 동작 이후 스트링의 DC 출력전압을 측정하였다. Table 5는 RSD 동작 이후 스트링 전압을 나타내고 있다. 모든 결과에서 RSD 동작 이후에 전압이 0으로 나타났으며 NEC 2020 기준(80V 이하)을 만족하고 있다.

Table 5. Rapid Shutdown Voltage

시험 횟수	DC 출력전압[V]	평균[V]
1	0	0
2	0	
3	0	

#### 4.3.3 통신 신뢰성

Sentinel Controller에서 출력된 신호와 RSD에서 출력된 신호를 비교하여 정확도를 나타냈다. Table 6은 통신 신뢰성 결과를 나타낸다. Sentinel Controller에서 100ms의 간격으로 10,000회의 동작 신호를 RSD에 보냈을 때 RSD는 9,995회 동작 하여 99.95%의 정확도를 나타냈다.

Table 6. RSD Communication Reliability

시험 횟수	Sentinel Controller 출력 신호	RSD 출력 신호	정확도
1	10,000	9995	99.95%

Fig. 4는 아크 고장 검출을 위한 시험 환경을 나타낸다.

Fig. 5는 아크 고장 검출을 위해 적용된 Arc Fault Generator를 나타낸다. Arc Fault Generator는 UL1699B 조건을 만족할 수 있도록 설계 및 제작하였다.

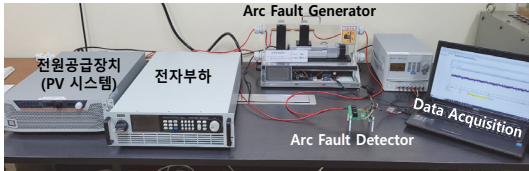
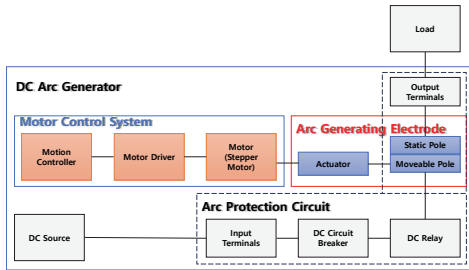
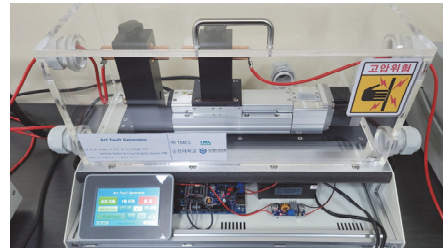


Fig. 4 Test Environment for Arc Fault Detection

Fig. 6은 아크 고장을 검출하기 위한 Arc Fault Detector를 나타낸다. Arc Fault Detector는 크게 변류기를 통해 노이즈를 검출하기 위한 부분과 불필요한 노이즈 신호를 제거하기 위한 Band-pass Filter로 구성되어 있다. Arc Fault Detector의 주요 사양은 다음과 같다.

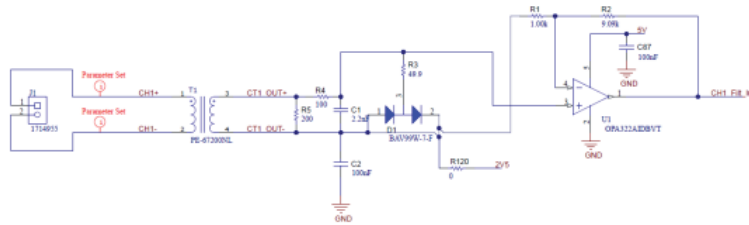


(a) 구성도

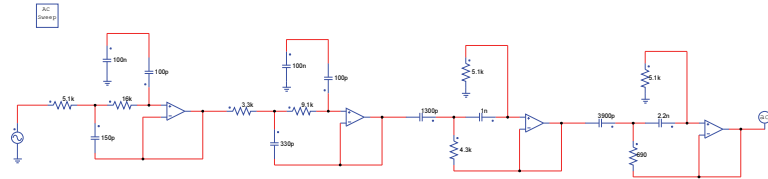


(b) 아크 발생 장치

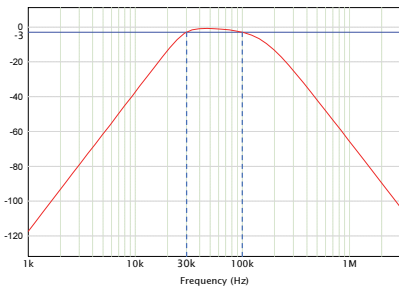
Fig. 5. Arc Fault Generator



(a) 변류기 및 게인 조정 회로



(b) Band Pass Filter



(c) Band Pass Filter Characteristic



(d) Arc Fault Detector PCB Circuit

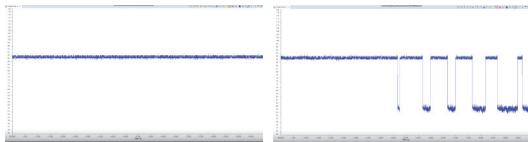
Fig. 6. Arc Fault Detector

- 입력 채널: 4채널
- 입력 범위: <1,000VDC, <10A
- 주파수 범위: 30kHz ~ 100kHz

Fig. 7은 Arc Fault Generator에 의한 아크 발생 상태를 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 Arc Fault Generator에 의해 아크가 발생하는 환경을 나타내고 있으며, Fig. 7(b), (c)는 Arc Fault Detector



(a) Arc Fault Condition



(b) Arc Fault: Normal Condition      (c) Arc Fault: Abnormal Condition

Fig. 7 Arc Fault Detector Test Results

Table 7. Arc Fault Detection Time

No	Arc Fault 발생 $T_1$	Arc Fault 검출 $T_2$	Arc Fault 검출 시간 $\Delta T = T_1 - T_2$
1	1[sec]	3[sec]	2[sec]
2	1[sec]	3[sec]	2[sec]
3	1[sec]	3[sec]	2[sec]
4	1[sec]	4[sec]	3[sec]
5	1[sec]	3[sec]	2[sec]
6	1[sec]	3[sec]	2[sec]
7	2[sec]	3[sec]	1[sec]
8	3[sec]	5[sec]	2[sec]
9	2[sec]	3[sec]	1[sec]
10	2[sec]	6[sec]	4[sec]
평균 시간			2.1[sec]

에 의해 아크 고장이 검출되는 특성을 나타낸다. Fig. 7(b)와 같이 아크 고장이 발생하지 않을 경우 고조파가 검출되지 않아 신호의 변화가 나타나지 않지만, Fig. 7(c)와 같이 아크 고장이 발생할 경우 고조파가 감지되어 신호의 변화가 나타난다. Arc Fault Detector는 이러한 신호의 변화를 통해 아크 고장을 검출한다.

Table 7은 Fig. 7의 시험을 통해 아크 고장이 검출된 시간을 나타내고 있다. 전체 10번의 시험에서 아크 고장 감출 시간은 평균 2.1[sec]초로 UL1699B의 기준시간인 2.5[sec] 이내로 나타나고 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 BIPV 시스템 안전성 향상을 위한 보호 시스템 구성 및 특성을 분석하였다.

BIPV 시스템의 화재 및 감전 등의 안전사고를 감소시키기 위한 보호 시스템으로 RSD와 Arc Fault Detector를 적용하였으며 이에 대한 특성을 분석하였다. RSD의 경우 제어 신호에 대한 동작 시간이 평균 0.1[sec]로 매우 짧았으며 RSD 동작 후 스트링의 전압이 0[V] 측정되어 Shutdown 동작이 안전하기 이뤄지는 것을 확인하였다. 또한 10,000회의 테스트에서 9,995번 정상 동작하여 99.95%의 동작 신뢰성을 나타냈다. Arc Fault Detector는 UL1699B 규격에 맞는 Arc Fault Generator를 적용하여 시험하였으며 10회의 아크 고장 시험에서 평균 2.1[sec]의 시간을 나타내어 UL1699B의 검출 시간 조건을 만족하였다.

따라서 이러한 보호 시스템을 BIPV에 적용할 경우 감전 및 화재 사고를 예방할 수 있으며 이를 통해 BIPV 시스템의 안전성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.



## 감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역특화산업육성+(R&D, S3364039)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

- [1] B. D. Dimd, S. Völler, O. -M. Midtgård, U. Cali and A. Sevault, "Quantification of the Impact of Azimuth and Tilt Angle on the Performance of a PV Output Power Forecasting Model for BIPVs," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 14, no. 1, pp. 194-200, Jan. 2024,
- [2] MarketsandMarkets, PHOTOVOLTAIC MARKET WITH COVID-19 IMPACT-GLOBAL FORECAST TO 2025, 2020.
- [3] B. R. Park, J. Y. Yun, N. H. Kim, J. W. Moon, "Analyzing Trends in Photovoltaic Systems for the Implementation of Zero-Energy Buildings," Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, vol. 24, no. 1, pp. 129-136, 2024
- [4] J. S. Kim, S. P. Kwon, "A Study on the Risk of Electric Shock from the Sprayed Water for Fire suppression of the PV Installed Building," Fire science and engineering, vol. 28, no. 6, pp. 47-51, 2014
- [5] FLUKE, "Top 3 solar PV safety hazards and how to avoid them," Fluke Resource Center
- [6] S. P. Kwon, Y. T. Han, W. S. Lim, D. H. Kim, J. S. Kim, "A Study on the Risk of Solar Photovoltaic Systems Installed on the Rooftop in a Domestic Fire," Korean Institute of Fire Science & Engineering Conference, pp, 464-467, 2012
- [7] 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.

---

(접수: 2024.05.08. 수정: 2024.05.16. 게재확정: 2024.05.20.)