

태양광발전시스템의 사고예방을 위한 고장모드 분석

오수정^{1†} · 김종민² · 장주희³

¹한국전기안전공사 전기안전연구원, 선임연구원

²한국전기안전공사 전기안전연구원, 책임연구원

³한국전기안전공사 전기안전연구원, 주임연구원

Failure Mode Analysis for Accident Prevention in PV Systems

Oh Su-Jeong^{1†} · Kim Chong-Min² · Jang Ju-Hee³

¹Senior Researcher, Electrical Safety Research Institute of Korea Electrical Safety Corporation (KESCO)

²Principal Researcher, Electrical Safety Research Institute of Korea Electrical Safety Corporation (KESCO)

³Assistant Researcher, Electrical Safety Research Institute of Korea Electrical Safety Corporation (KESCO)

[†]Corresponding author: krystaloh@kesco.or.kr

Abstract

The installation of photovoltaic (PV) systems has been increasing globally and so has the number of related accidents. In South Korea, many PV systems are installed in mountainous areas; hence, they are particularly vulnerable to natural disasters and safety incidents. However, most existing studies on PV system failures have focused on improving efficiency, paying limited attention to safety aspects. Furthermore, in many cases, when a PV accident occurs, the faulty equipment is simply replaced, and the system resumes operation without conducting and considering a thorough failure analysis. This study applies the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method to analyze the PV system failure modes and prioritize risks. Failure modes are categorized based on major PV components, such as modules, inverters, junction boxes, connectors, and cables, with classifications for potential failures being associated with each component. A total of 29 failure modes were identified, and a survey was conducted among PV industry professionals to assess the severity, occurrence, and detection of each failure mode. Based on these results, Risk Priority Numbers (RPN) were calculated. Key failure modes, such as bypass diode connection failure, cable corrosion, and inverter switching element damage, were evaluated according to the FMEA criteria. Based on this evaluation, specific prevention and mitigation measures are proposed.

Keywords: 태양광발전시스템(PV systems), 태양광설비 구성요소(PV components), 사고 예방(Accident Prevention), 고장모드 영향분석(Failure Mode and Effect Analysis), 위험우 선순위(Risk Priority Number), 고장분류(Failure Classification)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.44, No.6, pp.105-115, December 2024
<https://doi.org/10.7836/kjes.2024.44.6.105>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 15 November 2024

Revised: 26 November 2024

Accepted: 26 November 2024

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

태양광은 기후 위기에 대응하기 위한 신에너지원으로서 미국, 일본, 독일 등 전세계적으로 지속적인 증가 추세이며, 글로벌 태양광 설치 시장 동향 보고서에 따르면 모듈을 포함한 태양광 설치단가가 지속적으로 하락함에 따라 태양광 수요가 증가하고 있으며, 중국 및 미국 등의 수요가 꾸준한 가운데 유럽 시장도 지속 성장할 것으로 보인다고 발표했다¹⁾.

국내 중장기 전력수급의 안정을 위해 전기사업법 제25조 및 동법 시행령 제15조에 따라 2년 주기로 수립되는 계획인 전력수급기본계획에 따르면, 올해 발표된 제11차 전력수급기본계획에서 정부는 2030년까지 태양광과 풍력의 설치 용량을 2022년 실적(23 GW) 대비 3배 이상인 72 GW로 확대할 계획이라고 발표했다. 또한, 2038년까지 재생에너지 보급 목표를 120 GW로 설정하였다. 이에 따라 국내 재생에너지 보급 비율을 높이기 위해서는 태양광과 풍력 설치가 대폭 늘어나야 하지만 3면이 바다인 지형 특징을 가지고 있음에도 국내 군사기지 및 군사시설 보호구역, 해역이용영향평가, 환경영향평가 등 해상 풍력발전설비 설치에는 규제 조건이 많아, 태양광 설치가 더 많이 보급될 것이라 예측된다.

또한 설치된 태양광발전시스템의 내용 연한이 늘어남에 따라 사고발생도 증가하고 있다. 태양광발전소의 최근 5년간 화재 발생 건수는 62건(2019), 69건(2020), 81건(2021), 99건(2022), 124건(2023)으로 점차 늘어나고 있으나²⁾, 사고 통계로는 간략한 결과만 제공할 뿐 구체적인 사고발생지점이나 피해 정도를 파악하는 데 무리가 있다. 태양광발전시설의 사고 증가에 따라 국내에서는 추가 건설보다 안전 운영을 위한 대책이 필요하다는 의견이 나오고 있다. 또한 국내는 지형 특성상 전체 면적의 70% 산지에 해당하며, 타 국가에 비해 산지에 설치된 태양광이 많아 산지 특성을 고려한 안전관리 또한 필요하다³⁾. 이러한 이유로 안전한 운영을 위한 위험성 평가에 대한 분석이 중요해지고 있으나, 현재까지 태양광 고장분석을 활용한 안전성 평가에 관한 연구는 발전 효율 향상 측면⁴⁾에서 주로 분석하거나 모듈, 인버터 중심으로 이루어졌다. 이러한 방향은 태양광발전시스템의 모든 구성요소의 고장에 대한 근본적인 문제해결 제시가 어려우며, 본 논문에서는 이러한 문제점 해결을 위해 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis, 고장모드 및 영향분석)를 통해 태양광발전시스템의 사고예방을 위한 고장모드 분석 연구를 수행하였다. 태양광발전시스템의 고장유형 정의 및 분석은 FTA (Fault Tree Analysis, 결함수분석)⁵⁾, FMEA^{6,7)}, 머신러닝⁸⁾ 등 다양한 방법으로 진행되고 있으며, 부품단위 고장모드를 정의⁹⁾하여 체계적으로 고장을 관리하고 있다. FTA는 고장의 원인을 트리 구조로 시각화하여 분석하며, 특정 고장(사고)의 근본 원인을 추적하는데 효과적이다. 이는 시스템 전체의 다양한 고장모드와 영향을 동시에 분석하기 보다는 특정 사건에 국한되어 분석할 가능성이 높다. 머신러닝은 데이터 기반으로 시스템의 고장 패턴을 학습하고, 고장예측 및 원인 분석을 자동화하여 실시간 분석이 가능한 기술이지만 충분한 데이터가 없을 경우 성능이 저하되며, 일부 모델은 결과를 해석하기 어려운 경우가 있다.

FMEA는 시스템 고장 분석 기법 중에 하나로 시스템 혹은 시스템을 구성하고 있는 요소의 고장이나 불량에 영향을 결정하기 위한 신뢰성 평가에 주로 활용되고 있으며, 시스템과 그 구성요소의 고장유형을 분석하여 시스템 자체의 영향을 정성적으로 평가하는 방식의 분석기법이다. 본 논문에서는 고장유형 분석 기술 중 시스템

의 잠재적 고장 모드를 식별하여 문제를 사전에 예방하는데 적합한 FMEA를 활용하였다.

본 논문에서는 태양광발전시스템의 구성요소를 기반으로 고장모드를 정의하고, 고장현상을 기준으로 구조화하였다. 정의한 각 고장유형에 대한 위험우선순위를 분석하고 우선순위가 높은 고장에 대한 원인파악과 예방방안을 제시한다. 또한, 국내 산지태양광의 비중이 높은 것을 고려하여 부지와 구조물 요소에 의해 태양광발전 시스템 고장을 가속화하는 요인들에 대해서도 정의하였다.

2. 태양광발전시스템 고장 분류

2.1 고장모드 영향분석 수행절차

본 연구에서는 태양광발전시스템의 사고가 발생하기 전에 잠재적인 고장모드를 식별하고 그에 따른 위험을 평가할 수 있는 FMEA를 수행하였다. FMEA는 Fig. 1과 같은 절차로 진행하였다.

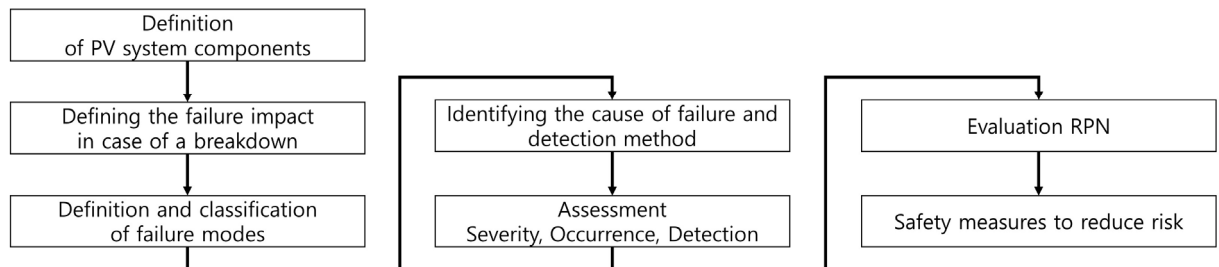


Fig. 1 FMEA Process

태양광발전시스템에 대한 고장모드 분석을 위해 시스템의 구성요소를 우선적으로 정의하였다. 태양광발전 시스템 주요 구성요소인 어레이, 접속함, 인버터, 커넥터, 케이블 5가지로 나누고, 이에 따른 세부 구성요소를 포함하여 총 10가지로 분류하여 Table 1에 기술하였다.

Table 1 PV system Component

Component	Sub-Component
Array	Cell//Module, Junction Box
Combiner Box	Fuse, Blocking Diode, Circuit Breaker
Inverter	Inverter, Inverter Component, FAN
Connector	Connector
Cable	Cable

본 논문에서는 고장모드에 대한 명확한 분류를 위해 고장(사고)발생 시 피해유형을 정의하고 이에 맞춰 고장 모드를 분류하였다. 각 고장모드는 심각도, 발생도, 검출도 결정을 위해 고장발생원인과 고장검출방법을 파악

하였으며, 심각도, 발생도, 검출도는 태양광 분야 종사자 대상 7점 리커트 척도 설문으로 결정하였다. 3가지의 개별적인 평가를 종합하여 RPN (Risk Priority Number, 위험우선순위)를 도출하였다. 마지막으로 위험우선순위 높은 주요 고장유형에 대해 위험 감소를 위한 개선사항을 제시하였다.

2.2 태양광발전시스템 고장유형 분류

기존 태양광발전시스템의 고장모드 정의 및 분석은 태양광의 발전방식과 옥외에 설치되는 특성에 따라 물리적, 전기적, 환경적 영향으로 구분하여 분석되었으며, 기존 분류체계를 Table 2에 기술하였다¹⁰⁻¹²⁾.

Table 2 Existing PV system Failure Classification¹⁰⁻¹²⁾

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Physical Fault	Internal Factors	Crack	-
		Bypass Diode Damage	-
	External Factors	Degradation	Discoloration, Delamination, Corrosion
		Crack	-
Electrical Fault	AC side	Inverter Failure	-
		Grid Issues	Islanding, Power Outage
	DC side	Array/Cable Failure	Short Circuit, Ground Fault, Open Circuit, Arc Fault
		MPPT Failure	-
	Temporary Effects	Bird Droppings, Clouds, Dust, Irradiance Fluctuations	-
Environmental Fault	Permanent Effects	Hotspot, Mismatch	-

물리적 결함은 제조, 운영상에 발생하는 기계적인 스트레스에 의한 고장을 나타내며 크게 내부요인과 외부요인으로 구분된다. 전기적 결함은 DC측과 AC측 고장으로 분류하였으며, 환경적 결함은 일사량, 그림자 영향, 날씨 등 태양광 어레이에 발생하는 영향위주로 분류하였다. 기존의 방식은 태양광발전시스템 주요 구성요소의 결함이 반영되지 않으며, 아크와 같은 일부 고장은 분류체계에 따라 고장유형으로 분류되기도 하지만 고장원인으로 분류하는 경우도 있었다.

본 연구에서는 기존 고장분류 체계에서 고장모드, 고장원인 내용이 혼재되어 병렬적인 구조를 이루지 못하고, 고장의 영향을 주로 모듈단계에서만 기술하였던 것을 개선하여 새로운 분류체계를 제시하였다.

태양광발전시스템의 고장모드 분류를 위해 어레이, 접속함, 인버터 등 태양광발전시스템의 구성요소별 고장모드를 먼저 정의하고, 각 고장으로 인해 발생하는 최종 고장영향을 기준으로 분류하였다. 최종 고장영향은 인버터 정지(설비사고), 과열(전기화재), 절연불량(감전) 3가지로 구분하였다. 이 3가지 고장영향이 태양광발전시스템 주요 구성요소와 세부 구성요소를 기준으로 세분화했을 때 구성요소별로 잠재적으로 발생가능성이 있는 고장을 분석한 결과 전체 고장모드는 29가지로 정의되었다. 고장모드분류 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Failure Mode List

Component	Sub-Component	Failure Mode	Failure Impact
Array	Cell/Module	Burn marks	Fire/Overheating
		PID	Insulation Failure
		Delamination	Insulation Failure
		Discoloration	Insulation Failure
		Corrosion	Inverter Shutdown, Insulation Failure
		Breakage	Inverter Shutdown, Fire/Overheating
		Module open	Inverter Shutdown
		Module shading	Fire/Overheating
		Soiling	Fire/Overheating
			Junction box
Bypass diode connection failure	Fire/Overheating, Insulation Failure		
Enclosure damage	Fire/Overheating		
Enclosure corrosion	Insulation Failure		
Combiner box	Fuse	Open	Inverter Shutdown, Fire/Overheating
		Not operation	Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure
	Blocking diode	Diode open	Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure
		Circuit Breaker	Open
	Not operation		Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure
Inverter	Inverter	Damaged	Inverter Shutdown
		Switching control failure	Inverter Shutdown
	Inverter component	Switching element damage	Inverter Shutdown
		DC link capacitor damage	Fire/Overheating
		FAN	FAN failure
Connector	-	Defect	Inverter Shutdown, Fire/Overheating
		Poor Contact	Inverter Shutdown, Insulation Failure
		Corrosion	Insulation Failure
Cable	-	Breakage	Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure
		Corrosion	Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure
		Enclosure Grounding corrosion	Inverter Shutdown, Fire/Overheating, Insulation Failure

2.3 태양광발전시스템 고장발생 원인 및 고장 가속화요소

고장에 대한 안전성 확보를 위해 태양광발전시스템 각 고장을 발생시키는 원인을 분석한 결과 고장원인은 전체 18가지로 분류하였다. 주요 고장원인은 수분유입, 외부충격, 과전류(단락전류, 역전류), 시공불량, 제조불량, 노후화 등¹¹⁾이 있으며 Table 4에 나타내었다.

각 고장유형별로 고장을 검출할 수 있는 방법으로는 육안점검, 모니터링, 절연저항계, 다기능계측기, IR카메라, I-V 커브 측정장비, EL 장비 등 7가지로 구분 지었다. 육안점검은 대부분의 고장 검출이 가능하며, 모니터링은 셀/모듈 고장과, 인버터 고장을 검출할 수 있다. 절연저항계는 모듈, 케이블, 커넥터의 부식을 검출할 수 있

으며, 다기능계측기와 IR카메라는 커넥터와 케이블 고장 검출이 가능하다.

또한, 고장을 가속화하는 요소는 태풍, 폭설 등 환경적 요소와 부지/구조물 측면에서 분석하였다. 국내 비중이 높은 산지 태양광의 안전성 확보를 위해 구조물 부식/흔들림, 모듈 배선 고정상태/배열 틀어짐, 구조물 기초 부 노출/파손/균열, 세굴현상, 토사적체/퇴적/침식 등 각 고장모드에 대해 부지/구조물 측면에서 영향을 미치는 가속화 요소와 사고예방을 위한 기초공사방법(콘크리트, 스파이럴, 보링그라우팅 등), 비탈면 처리방법(시드스프레이, 녹생토공법 등), 옹벽시공방법(콘크리트, 석축 등)별로 상대적으로 안전성이 높은 공사방법에 대해서도 고려하였다.

Table 4 Classification of failure causes

Environmental factors	Physical factors	Electrical factors	Other factors
Moisture Ingress	External impact	Overvoltage	Installation defect
Cloud, Bird droppings, etc.	Poor Contact	Overcurrent (short-circuit current, reverse current)	Manufacturing defect
Soiling	Poor Ventilation		Software defect
Aging	Cell damage		
External obstacles (shading)	Enclosure cover separation		
	Connector disconnection		
	Use of incompatible connectors		
	Cable disconnection or break		

3. 안전성 측면에서의 위험우선순위 분석

3.1 심각도, 발생도, 검출도 평가

정의한 고장모드에 대해 심각도, 발생도, 검출도 세가지 측면에서 위험성을 평가하였다¹³⁾. 심각도는 고장이 시스템에 미치는 영향의 심각한 정도, 발생도는 고장이 얼마나 빈번하게 발생하는지에 대한 발생 빈도, 검출도는 고장발생을 검출할 수 있는 정도이다. 심각도, 발생도, 검출도에 대해 리커트 척도 설문 평가방법으로 위험우선순위를 도출하였다. 리커트 척도는 설문조사에서 자주 쓰이는 응답척도로, 응답 범주에 서열성이 있는 문항에 대한 평가를 진행하는 양극 척도 방법이다. 본 논문에서는 각 고장유형에 대한 위험성 평가에 변별력을 주기 위해 7점 척도를 가지고, 태양광 관련 분야 종사자(설계, O&M, 안전관리자 등)들을 대상으로 설문을 진행하였다.

설문은 전체 53명이 응답하였고, 응답의 신뢰성을 분석하여 신뢰도가 낮은 응답은 제거하였다. 유사한 질문을 반복하거나, 반응 시간을 분석하는 등 다양한 방법이 있지만, 본 설문에서는 변동성 분석과 무관심 응답을 확인하는 방법을 사용하였다. 설문조사 응답자의 신뢰도 분석으로 전체 53건의 응답에 대해 신뢰도가 낮은 3건의 응답을 제외하고, 50건의 응답을 기반으로 태양광발전시스템 고장모드에 대해 심각도, 발생도, 검출도 설문 결과를 가지고 평가하였다. 일반적으로 리커트 척도 설문조사의 대푯값은 평균, 중앙값, 최빈값으로 정하는데, 이

설문조사 응답 분석 결과 각 항목별 응답 데이터에 극단적이 값이 많이 분포되어 있어, 대푯값은 중앙값으로 설정하였다. 중앙값은 응답 점수를 정렬했을 때 가운데 있는 값으로, 데이터의 중심 경향을 나타내는데 유용하다.

3.2 위험우선순위(RPN) 평가결과

설문 기반 정의한 심각도, 발생도, 검출도의 대푯값으로 고장모드별 RPN을 계산하였다. RPN은 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)를 각각 곱한 값이다. 전체 고장모드에 대해 도출된 RPN을 순위대로 Fig. 2에 나타내었다.

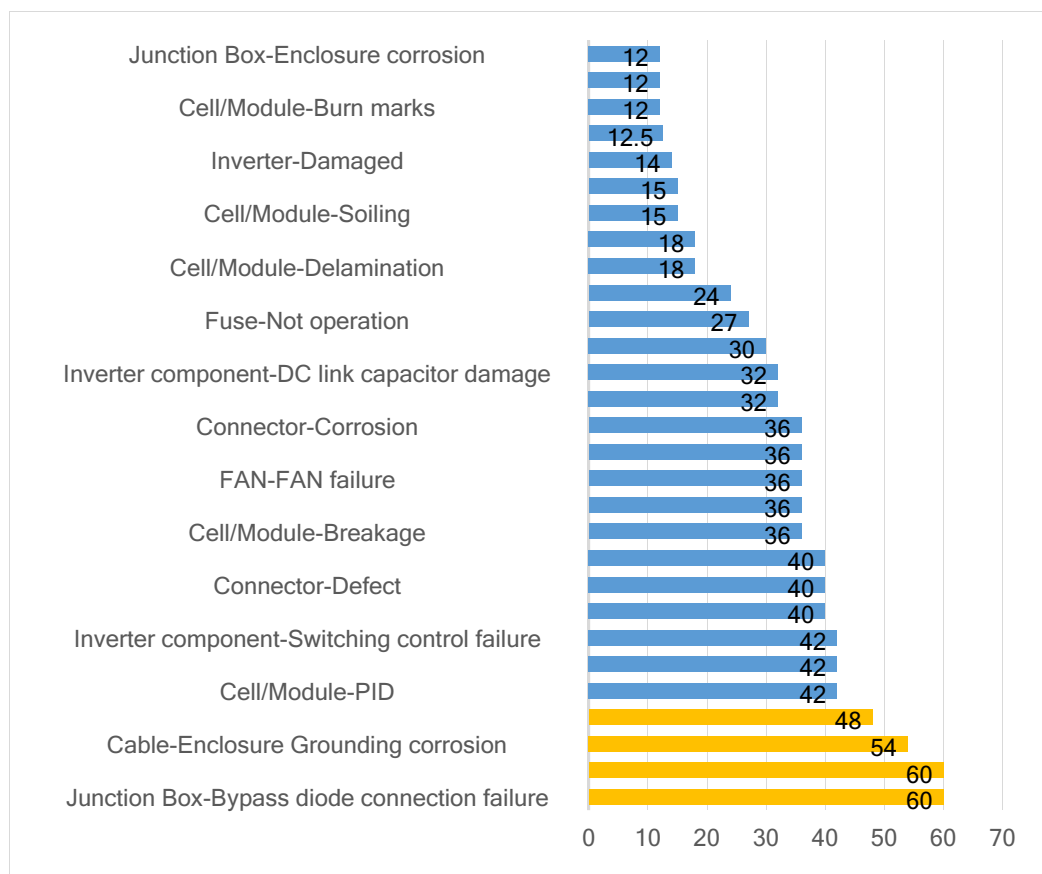


Fig. 2 RPN result

태양광발전시스템의 안전 측면에서 셀/모듈 관련 고장보다 정션박스나 케이블 관련 고장이 더 위험 우선순위가 높음을 알 수 있다. 위험우선순위가 높은 고장들을 분석한 결과, 바이패스다이오드 연결불량 고장과 케이블 부식은 심각도 5, 발생도 2, 검출도 4로 동일하였으며 이는 발생빈도가 높지는 않지만 고장을 검출하기 어렵다는 공통점을 가지고 있다. 반면, 셀/모듈 관련 고장은 일부 PID를 제외하고는, 심각도 측면에서 화재나 인명 피해를 일으킬 가능성이 작아 우선순위가 낮게 측정되었다. 예를 들어, 모듈 변색이나 박리의 경우 심각도 3, 발

생도 2, 검출도 3으로 나타났다. 이는 태양광발전시스템 안전성 확보를 위한 위험성 평가방안 설계 시 시스템에 영향을 크게 미치고 고장 검출이 어려운 고장유형에 대해 특별히 더 주의를 기울여야 한다는 것을 의미한다.

4. 태양광발전시스템 Safety FMEA 결과

4.1 Safety FMEA 표준항목 정의

사고예방을 위한 고장모드 영향분석을 효과적으로 수행하기 위해서는 정의한 고장모드와 고장에 대한 영향, 고장원인, 안전조치사항(위험 감소를 위한 개선사항) 등이 포함된 표준항목을 정의하고 그 기준에 따라 고장에 대한 분석결과를 제시해야 한다. 본 논문에서는 위험우선순위가 높은 주요고장에 대한 평가 결과 기술을 위해 표준항목을 다음과 같이 정의하였다.

- (1) 고장기기(Faulty Equipment): 고장 발생 가능성이 있는 대상 기기
- (2) 고장모드(Failure Mode): 고장기기에서 발생할 수 있는 고장유형
- (3) 고장영향(Failure Impact): 해당 고장의 정도가 심각해졌을 때 시스템에 미칠 것으로 예상되는 영향
- (4) 고장원인(Cause of Failure): 각 고장유형이 발생하게 된 직·간접적인 원인
- (5) 고장가속화요소(Failure Acceleration Factors): 고장유형이 발생했을 때 고장 정도를 가속하는 요인
- (6) 고장검출방법(Detection Method): 고장을 검출할 수 있는 방법
- (7) 안전조치사항(Safety Measures): 고장 발생 가능성을 낮추거나 고장으로 인한 영향을 완화하는 방안

4.2 주요고장 평가결과

본 논문에서 도출한 위험우선순위 결과에 따르면, 상위 4가지 고장은 바이패스다이오드 연결불량/분리, 케이블 부식, 케이블 외함접지 부식, 인버터 내부 스위칭소자 손상으로 나타났다. 고장유형별로 FMEA 표준항목에 따라 평가한 결과를 Tables 5 ~ 8에 기술하였다. 4가지 고장으로 한정지은 것은 위험우선순위 평가 결과 다른 고장유형보다 높은 점수를 가졌으며, 그 외 고장은 점수가 거의 비슷하여 상위 4개 고장이 시스템에 영향을 미치는 정도가 타 고장들에 비해 더 크다고 판단하였다.

Table 5 Bypass Diode Disconnection Evaluation Result

Faulty Equipment	Array – Junction Box – Bypass diode
Failure Mode	Bypass Diode Disconnection
Failure Impact	Overheating/Fire, Insulation Failure
Cause of Failure	Manufacturing defects (soldering, wiring), Installation defects (poor fixation)
Failure Acceleration Factors	Module delamination near the junction box
Detection Method	IR camera, Multifunctional measuring instrument, I-V curve measurement equipment
Safety Measures	IEC 61215 certification check, Replacement of severely faulty modules, Regular inspection

Table 6 Cable Corrosion Evaluation Result

Faulty Equipment	Cable
Failure Mode	Cable Corrosion
Failure Impact	Inverter Shutdown, Overheating/Fire, Insulation Failure
Cause of Failure	Manufacturing defects, Moisture ingress, Overcurrent, Poor contact
Failure Acceleration Factors	Climate (typhoon/rain), Installation environment (coastal area, etc.), Moisture inside cable
Detection Method	Visual inspection, Insulation resistance tester, IR camera
Safety Measures	Protection of cables from moisture, Use of insulating material or copper wire, Careful installation regarding installation path and cable bending

Table 7 Cable Grounding Corrosion Evaluation Result

Faulty Equipment	Cable
Failure Mode	Cable Grounding Corrosion
Failure Impact	Inverter Shutdown, Overheating/Fire, Insulation Failure
Cause of Failure	Moisture ingress, Overcurrent, Poor contact
Failure Acceleration Factors	Climate (typhoon/rain), Installation Environment (coastal area, etc.), Moisture inside cable
Detection Method	Visual inspection, Insulation resistance tester, IR camera
Safety Measures	Verify minimum thickness of grounding wire, Check for poor cable contact and loose screws, Regular inspection

Table 8 Inverter Switching Element Damage Evaluation Result

Faulty Equipment	Inverter Component
Failure Mode	Inverter Switching Element Damage
Failure Impact	Inverter Shutdown, Overheating/Fire
Cause of Failure	Manufacturing defects, Aging, Overcurrent
Failure Acceleration Factors	Foreign substances inside the inverter, Surge voltage
Detection Method	Monitoring, Multifunctional measuring instrument
Safety Measures	Design with attention to protection circuit activation during overcurrent, Install a power cutoff function in case of ground fault, Regular inspection

상위 4가지 고장모드에 대해 기술한 고장 가속화요소는 주로 전기적인 요인과 외부 환경적인 요인이 주를 이루었으나, 본 연구에서는 구조물 기초형태(콘크리트, 스파이럴 등)나 비탈면 안전시설, 재해방지시설 유형별로 태양광발전시스템에 고장을 일으킬 가능성이 있는 부지·구조물 측면에서의 고장 가속화요소도 분석하였다. 주요항목으로 비탈면 안전시설인 옹벽에서는 전도, 균열, 석축 변형 등이 있으며, 재해방지시설인 배수로의 배수상태, 토사유실 가능성이 높은 기초공사방법(콘크리트 독립 기초) 등이 있다.

5. 결론

태양광 시스템의 설치 증가와 사용연한이 늘어남에 따라 안전한 운영을 위한 고장에 대한 위험성 평가 연구가 다양하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 고장분석 종류 중 하나인 FMEA를 통해 태양광발전시스템의 안전성 측면에서의 위험성 평가를 위해 새로운 고장모드를 제시하고, 이에 대한 위험우선순위를 도출하였으며, 위험성이 높은 주요 고장유형에 대해 FMEA 표준항목에 따라 평가하였다. 이를 통해 고장원인, 고장현상 등이 혼재되어 사용되고 있던 고장유형을 명확히 분류하였으며, 정의한 29가지 고장유형에 대해 태양광 분야 전문가 대상으로 설문조사를 실시하여 위험우선순위를 선정하였다. 또한 FMEA기반 위험성 평가를 위한 표준항목에는 구조물 및 환경 적인 요소까지 고려한 고장을 가속화하는 요소까지 포함하였다. FMEA 결과 평가는 위험우선순위가 높은 상위 4가지 고장 유형(바이패스다이오드 연결불량/분리, 케이블 부식, 인버터 스위칭소자 손상 등)에 대해 해당 고장 발생 시 위험성과 예방·조치방안을 제시하고, 태양광발전시스템에서 발생가능성이 있는 고장모드와 위험성 순위를 제시함으로써 태양광발전시스템 사고예방을 위한 시스템 관리 필수항목 및 위험성 판단에 기여하였다.

본 논문에서 정의한 고장모드와 위험우선순위는 태양광 발전설비 시스템의 안전등급제의 적용을 위해 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2022-KP002806).

REFERENCES

1. Korea Eximbank, PV Energy Industry Trends in the Second Half of 2023, Vol. 2024-SEMI-ANNAL Report-1, Seoul, Republic of Korea, 2024.
2. National Fire Data System (Republic of Korea), Fire Statistics. <https://www.nfa.go.kr>. last accessed on the 9th September 2023.
3. Kim, H., Yang, G., Nam, C., Jeong, S., and Jung, S., Solar Photovoltaic Industry in Korea: Current Status and Perspectives, Vol. 45, No. 2, pp. 107-118, 2023.
4. Wang, M.-H., Chen, M.-J., Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems, International Journal of Photoenergy, Vol. 2012, 892690, 2012.
5. Ong, N. A. F. M. N., Sadiq, M. A., Md Said, M. S., Jomaas, G., Tohir, M. Z. M., and Kristensen, J. S., Fault Tree Analysis of Fires on Rooftops with Photovoltaic System, Journal of Building Engineering, Vol. 43, 103752, 2022.
6. Colli, A., Failure Mode and Effect Analysis for Photovoltaic Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 50, pp. 804-809, 2015.

7. Li, J., Zhang, Y., Fang, H., and Fang, S., Risk Evaluation of Photovoltaic Power Systems: An Improved Failure Mode and Effect Analysis under Uncertainty, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 414, 37620, 2023.
8. Basnet, B., Chun, H., and Bang, J., An Intelligent Fault Detection Model for Fault Detection Photovoltaic Systems, *Journal of Sensors*, Vol. 2020, 6960328, 2020.
9. Reliability Information Analysis Center, Failure Modes/Mechanisms Distribution (FMD-2016), Quanterion Solutions Inc., NewYork, U.S., 2016.
10. Appiah, A. Y., Zhang, X., Ayawli, B. B. K., and Kyeremeh, F., Review and Performance Evaluation of Photovoltaic Array Fault Detection and Diagnosis Techniques, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2019, 6953530, 2019.
11. Venkatakrishnan, G. R., Rengaraj, R., Tamilselvi, S., Harshini, J., Sahoo, A., Saleel, C. A., Abbas, M., Cuce, E., Jazlyn, C., Shaik, S., Cuce, P. M., Riffat, S., Detection, Location, and Diagnosis of Different Faults in Large Solar PV System-A Review, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 18, pp. 659-674, 2023.
12. Paul, M. M. R., Mahalakshmi, R., Karuppasampandian, M., Bhuvanesh, A., and Ganesh, R. J., Classification and Detection of Faults in Grid Connected Photovoltaic System, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, Vol. 7, pp. 149-154, 2016.
13. Mikulak, R. J., McDermott, R., and Beauregard, M., *The Basics of FMEA 2nd Edition*, CRC Press, Florida, U.S., 2017.