

태양광 발전 PCS 구성부품에 대한 열적특성 및 고장모드영향분석

김두현 · 김성철* · 김운복*

충북대학교 안전공학과 · *한국폴리텍 청주대학

(2018. 5. 30. 접수 / 2018. 7. 6. 수정 / 2018. 8. 6. 채택)

Thermal Characteristic and Failure Modes and Effects Analysis for Components of Photovoltaic PCS

Doo-Hyun Kim · Sung-Chul Kim[†] · Yoon-Bok Kim^{*}

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

^{*}Korea Polytechnics College Cheongju Campus

(Received May 30, 2018 / Revised July 6, 2018 / Accepted August 6, 2018)

Abstract : This paper is analyzed for the thermal characteristics(1 year) of the 6 components(DC breaker, DC filter(including capacitor and discharge resistance), IGBT(Insulated gate bipolar mode transistor), AC filter, AC breaker, etc.) of a photovoltaic power generation-based PCS(Power conditioning system) below 20 kW. Among the modules, the discharge resistance included in the DC filter indicated the highest heat at 125°C, and such heat resulting from the discharge resistance had an influence on the IGBT installed on the rear side the board. Therefore, risk priority through risk priority number(RPN) of FMEA(Failure modes and effects analysis) sheet is conducted for classification into top 10 %. According to thermal characteristics and FMEA, it is necessary to pay attention to not only the in-house defects found in the IGBT, but also the conductive heat caused by the discharge resistance. Since it is possible that animal, dust and others can be accumulated within the PCS, it is possible that the heat resulting from the discharge resistance may cause fire. Accordingly, there are two options that can be used: installing a heat sink while designing the discharge resistance, and designing the discharge resistance in a structure capable of avoiding heat conduction through setting a separation distance between discharge resistance and IGBT. This data can be used as the data for conducting a comparative analysis of abnormal signals in the process of developing a safety device for solar electricity-based photovoltaic power generation systems, as the data for examining the fire accidents caused by each module, and as the field data for setting component management priorities.

Key Words : photovoltaic, electrical fire, IGBT, discharge resistance, PCS, FMEA(Failure modes and effects analysis)

1. 서론

현정부에서는 원전과 석탄 발전의 비중을 축소하고 재생에너지로 대체하기로 했다. 특히 제 8차 전력수급 기본계획에 신재생에너지발전량 목표를 상향 조정하였다. 2030년까지 신재생에너지가 전체 전력 생산에서 차지하는 비율을 20%로 하였다¹⁾. 이전 정부에서는 2035년까지 11%의 목표치로 했던 것에 대해 상향치이다.

신재생에너지 중에서도 현재 보급이 가장 많은 것은 태양전지 기반의 태양광 발전 시스템이다. 태양전지 기반의 태양광 발전 시스템은 기후가 전력생산과 직결되기 때문에 기후에 매우 민감하다. 국내 기후는 지역

별로 태양광 발전에 적합하거나 또는 적합하지 않다. 그럼에도 불구하고 태양광발전시스템은 대중소를 가리지 않고 토지만 확보되면 바로 설치 가동시키고 있다. 이런 이유 때문에 태양광 발전의 효율성과 전력생산량의 불균형, 전력품질의 저하, 부품의 고장으로 관리가 힘들어 지고 종종 화재가 발생한다. 가장 큰 문제점은 태양광 발전 설비는 초기에는 높은 관심을 보이다가, 차츰 관심이 떨어지고 이로 인한 관리 부재로 이어져 나중에는 방치하는 수준에 이른다. 이런 경우에 화재가 발생하면 어떤 부품에 대한 고장 또는 어떤 원인에 의해서 발생했는지를 알 수가 없다²⁻³⁾. 태양광 발전 설비는 옥외 또는 옥내에 설치된다. 옥외의 설

[†] Corresponding Author : Sung-Chul Kim, Tel : +82-43-267-2463, E-mail : ksc3650@naver.com

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

치되는 설비는 태양전지 어레이와 컨터롤박스이며, 옥내는 PCS(Power conditioning system)와 이를 관리하는 모니터링 소프트웨어로 구분된다. 설비 자체적으로 다양한 문제점이 발생하는데 사람 및 동물에 의한 파손, 부품자체의 결함, 관리적 문제점, 환경적인 문제점 등 상호 복잡하게 연계되어 발생된다. 여기서 사람 및 동물에 의한 파손과 환경적인 문제점은 육안으로 식별과 기상으로 그 문제점이 바로 발견된다^{4,6)}. 그러나 부품 자체의 결함과 관리적 문제로 발생하는 정상작동 시 또는 비정상작동 시에 부품개개의 열적 특성은 알 수가 없다. 실태조사와 신뢰성 분석을 통하여만 가능하다. 정상작동 시의 온도 데이터는 비정상작동 시의 온도와 상호비교하거나, 태양광 발전 시스템의 건전성 분석, FMEA(Failure modes effects analysis)를 통한 관리 부품우선순위를 정하는데 활용할 수 있다. 또한 이런 정상작동 시의 측정데이터는 최대 1년간의 데이터를 요구한다. 측정시간은 태양광 효율이 가장 높은 맑은 날을 기준으로 해야 하며, 이 데이터가 확보된 후에 실험을 통한 과전류, 접촉불량, 단락 등의 고장 전류에 대한 연구가 추가적으로 이행되어야 한다. 또한 부품별 잠재 고장 모드를 분류하고 고장 모드가 발생할 수 있는 잠재 원인과 잠재 영향을 도출해야 한다.

따라서 본 연구에서는 정상 작동 시의 열적 데이터를 확보하기 위하여 청주 C대학 설치된 20 kW 이하 태양광 발전 설비를 선정하였고 1년간의 열적 데이터를 측정하였다. 또한 PCS의 구성부품을 분류하고 FMEA를 통한 상위 10%의 위험우선순위를 도출하였다. 열적 특성과 위험우선순위를 분석하여 부품간의 설계방안을 제시하고자 한다.

2. 태양광발전 PCS의 화재사례 및 FMEA 기법

2.1 태양광발전 PCS의 화재사례

태양광 PCS에서 가장 중요한 부품은 IGBT (DC/AC convert)이다. IGBT는 다양한 전자제품과 연결되어 있으며, 열이 발생하면 안 되기 때문에 방열팬을 추가적으로 설치하고 있다. IGBT는 지역마다 다르겠지만 태양광 축적이 높은 5~9월 사이에 높게 나타나고 있다. 정상상태에서는 문제가 없으나 높은 열의 경우는 IGBT의 허용온도를 초과하게 되고 나중에는 절연이 파괴되어 폭발하게 된다⁷⁾. IGBT의 사고 시에는 PCS의 기관 교체할 정도로 완전히 전소된다. Fig. 1은 20 kW 급의 PCS에서 화재사고를 나타내었다. Fig. 1 a)~c)는 IGBT의 폭발로 인하여 완전전소, 부분 파괴, 전자기관 전소등을 나타내었다.



a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3

Fig. 1. Incident cases of IGBT.

2.2 FMEA 기법

FMEA는 단일 고장 모드를 규명하고, 그 고장 모드가 다음 상위수준의 시스템에 미치는 영향을 평가하는 분석과정을 반복하여, 결과적으로 전체 시스템에 미치는 단일고장의 영향을 파악하는 기법이다⁸⁾. FMEA의 목적을 한마디로 요약하면 “위험 식별과 그 영향 평가”이다⁹⁾. 이런 위험 식별과 영향평가를 위해서는 PCS에 포함된 구성부품을 분류하고 부품별 고장모드, 고장발생원인, 고장영향을 분석하여 위험우선순위를 도출하면 가능하다. 따라서 신재생과 관련하여 미국의 “SEMATECH”에서 제시한 위험우선순위를 토대로 심각도, 발생도, 검출도의 등급을 제시하였다^{8,10)}. RPN은 식 (1)과 같은 심각도, 발생도, 검출도를 모두 동일한 중요성을 두고 평가한다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

Table 1. Severity ranking criteria⁽¹⁰⁾

Rank	Description
1	Failure is of such minor nature that the customer (internal or external) will probably not detect the failure.
2	Failure will result in slight customer annoyance and/or slight deterioration of part or system performance.
3	Failure will result in customer dissatisfaction and annoyance and/or deterioration of part or system performance.
4	Failure will result in high degree of customer dissatisfaction and cause non-functionality of system.
5	Failure will result in major customer dissatisfaction and cause nonsystem operation or non-compliance with government regulations.

Table 2. Occurrence ranking criteria⁽¹⁰⁾

Rank	Description
1	An unlikely probability of occurrence during the item operating time interval. Unlikely is defined as a single failure mode (FM) probability < 0.001 of the overall probability of failure during the item operating time interval.
2	A remote probability of occurrence during the item operating time interval (i.e. once every two months). Remote is defined as a single FM probability > 0.001 but < 0.01 of the overall probability of failure during the item operating time interval.
3	An occasional probability of occurrence during the item operating time interval (i.e. once a month). Occasional is defined as a single FM probability > 0.01 but < 0.10 of the overall probability of failure during the item operating time interval.
4	A moderate probability of occurrence during the item operating time interval (i.e. once every two weeks). Probable is defined as a single FM probability > 0.10 but < 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.
5	A high probability of occurrence during the item operating time interval (i.e. once a week). High probability is defined as a single FM probability > 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.

NOTE: Quantitative data should be used if it is available.

For Example:

0.001 = 1 failure in 1,000 hours

0.01 = 1 failure in 100 hours

0.10 = 1 failure in 10 hours

Table 3. Detection ranking criteria⁽¹⁰⁾

Rank	Description
1	Very high probability that the defect will be detected. Verification and/or controls will almost certainly detect the existence of a deficiency or defect.
2	High probability that the defect will be detected. Verification and/or controls have a good chance of detecting the existence of a deficiency or defect.
3	Moderate probability that the defect will be detected. Verification and/or controls are likely to detect the existence of a deficiency or defect.
4	Low probability that the defect will be detected. Verification and/or controls not likely to detect the existence of a deficiency or defect.
5	Very low (or zero) probability that the defect will be detected. Verification and/or controls will not or cannot detect the existence of a deficiency or defect.

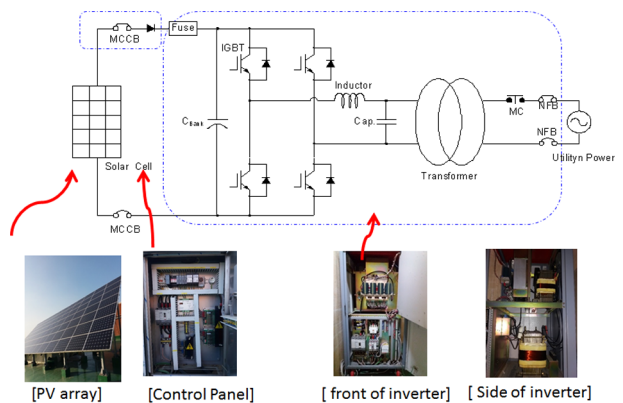
Table 1~3은 심각도, 발생도 및 검출도에 대한 각각의 기준을 나타냈다. 각각의 기준은 1-5 단계로 제시하였다^{8,10)}. 따라서 RPN 값은 1과 125사이로 정했으며 숫자가 크면 관리를 우선적으로 실행해야 한다는 의미를 포함하고 있다.

3. 태양광 발전 PCS의 구성부품 분류,

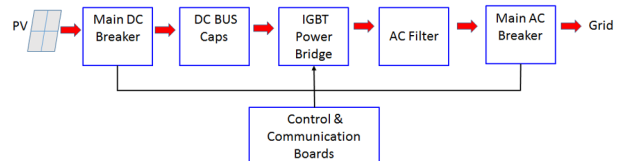
열적 특성 및 고장모드영향분석

3.1 태양광 발전 PCS의 구성부품 분류

태양광 발전 시스템의 구성은 크게 태양전지 어레이, 접속함, PCS로 구분한다. 또한 설치장소는 외부와 내부로 나누어지며, 외부에는 태양전지 어레이와 접속함, 내부는 PCS와 모니터링 소프트웨어(PC)가 설치되어 있다. 외부적 환경에 의한 영향으로 태양전지에서 문제가 생기면 접속함에서 1차적으로 방어하고 1차 방어가 실패했을 경우는 PCS에서 이를 정전 또는 차단기를 동작시킨다. 태양광 발전의 모니터링은 PCS에서 상태를 분석하고 있다. PCS의 구성부품은 DC 차단부, DC 필터(DC bus capacitor, Discharge resistance), IGBT power bridge, AC 필터(Reactor), AC 차단부로 구성되어 있다. DC 차단부는 PV인버터와 PV모듈을 연결하거나 분리하는 스위치로 작동한다. DC bus capacitor는 DC 전압의 리플(Ripple)을 감소하고 DC 링크 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 한다. 추가적인 이상전압 방지를 위하



a) Electric circuit



b) Diagram of 3-phase PCS

Fig. 2. Schematic of 20 kW photovoltaic power generation system.

여 DC bus capacitor와 방전저항을 병렬로 구성한다. IGBT Power Bridges는 직류전력을 교류전력으로 변환하는 주 스위칭 소자이며 AC 필터와 주 AC차단기를 통해 그리드(Grid)에 AC 전원을 공급한다. AC 필터는 IGBT에서 PWM(Pulse width modulation) 제어에 의해 출력된 AC 출력전압을 정현파로 만들어 주며 출력전류 고조파를 저감시키는 역할을 하며 리액터의 L값은 인버터 용량에 따라 다르게 설치된다. AC 차단기는 Grid와 PCS내의 고장전류 시에 연결하거나 분리하는 차단기로 동작된다.

Fig. 2 a)는 회로도를 b)는 3상 PCS의 구성부품 및 동작특성을 나타내었다.

3.2 태양광 발전 PCS의 열적특성

20 kW급의 태양광 발전설비의 PCS에 대하여 DC 차단부, DC 필터부(커패시터, 방전저항 포함), IGBT, AC 필터부, AC 차단기로 크게 6개 구성부품에 대하여 1년간(2017년) 열적데이터를 측정하였다. 측정장치는 히오키사의 열화상 카메라를 이용하였고, 일주일 동안 맑은 날을 고려하여 1개월에 10회를 측정하여 평균데이터를 출력하였다. PCS가 건물내부에 설치되어 있어 건물내부를 주위 온도로 하였다. 계절별 주위 온도는 봄은 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$, 여름은 $24\pm 4^{\circ}\text{C}$, 가을은 $18\pm 4^{\circ}\text{C}$, 겨울은 $6\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. Fig. 3은 6개 구성부품에 대한 측정지점을 나타내었다.

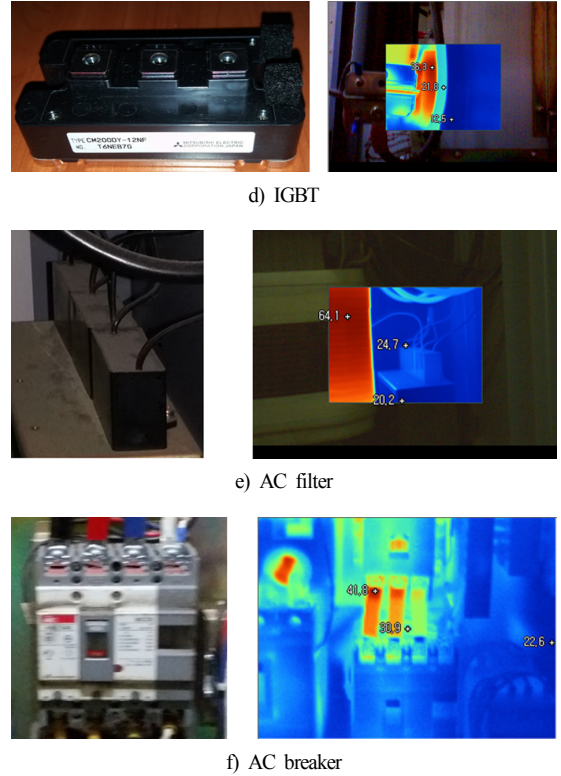
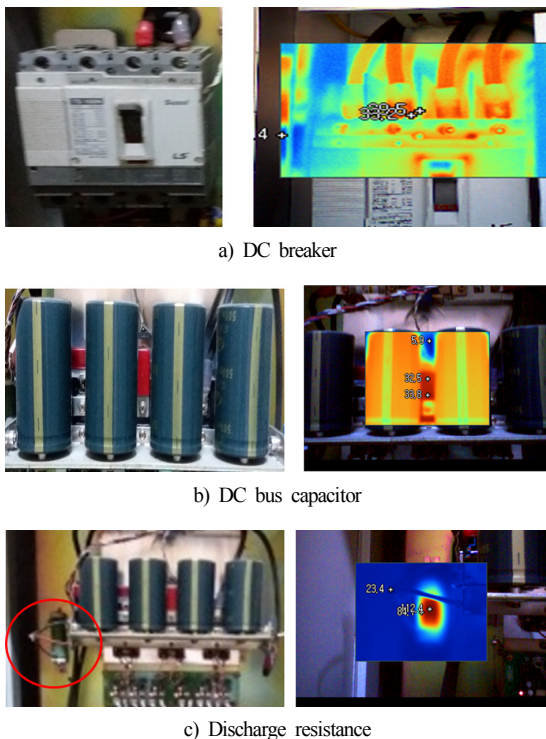


Fig. 3. Temperature measurement point for components.

DC 차단부는 태양전지 Array에서 입력되는 DC 전원에 대하여 1차적 안전장치로 과전류 및 과부하가 발생했을 경우 이를 차단하는 역할을 한다. 최고 온도는 8월에 40°C 가 나타났으며 최저 온도는 2월에 27°C 가 나타났다.

DC 필터부는 DC 버스 커패시터와 방전저항으로 구분된다. 최고 온도의 경우는 9월에 48°C 가 나타났으며 최저온도는 1월에 34°C 가 나타났다. DC 버스 커패시터와 병렬 연결되어 있으며, 이상전압 발생 시의 안전장치로 작동되고 있다. 정상상태임에도 불구하고 6~8월에 125°C 최고 온도가 나타났으며, 최저온도는 2월 110°C 로 나타났다. 방전저항의 설치는 기판 앞면에 IGBT는 기판 뒷면에 설치되어 있다. 방전저항의 높은 열은 금속재질의 기판을 달구게 되고 이 기판은 열에 예민한 PCS 부품에 전달에서 폭발이나 또는 절연 파괴를 일으킬 수 있다. 방전저항에 대하여는 방열판을 설치하든지, 주요부품과의 이격거리를 두어 열의 전도를 피할 수 있는 구조로 설계되어야 한다¹¹⁾.

IGBT는 추가적으로 방열판과 팬이 설치되어 있으며 이상온도(60°C)이상의 경우는 스위칭 작업을 멈추고 열이 내려가면 다시 작동하는 형식으로 되어 있다. 최고 온도는 58°C 로 나타났으며, 최저온도는 38°C 까지 나타났다. 다른 부품에 비해 다소 높은 열이 나타났으

며, 특히 IGBT는 앞면에 설치된 방전저항의 전도열에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 방전저항과 IGBT의 이격거리를 고려하여 설계가 필요하다.

AC 필터부는 IGBT의 온도에 영향을 받는 것으로 나타났다. IGBT와 함께 7~8월에 높은 열을 보였고 1월에는 25℃로 가장 낮은 온도를 보였다.

AC 차단부는 각 R상, S상, T상에서 30℃에서 43℃까지 월별 격차 온도를 보였다. 발전량에 따른 7월~9월

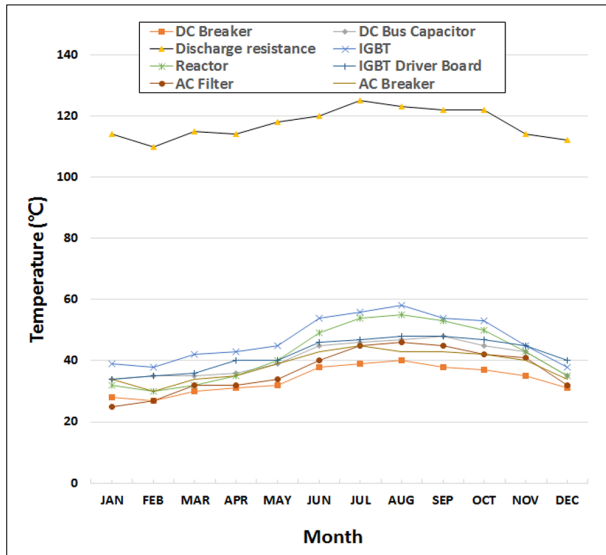


Fig. 4. Characteristics of temperature for components.

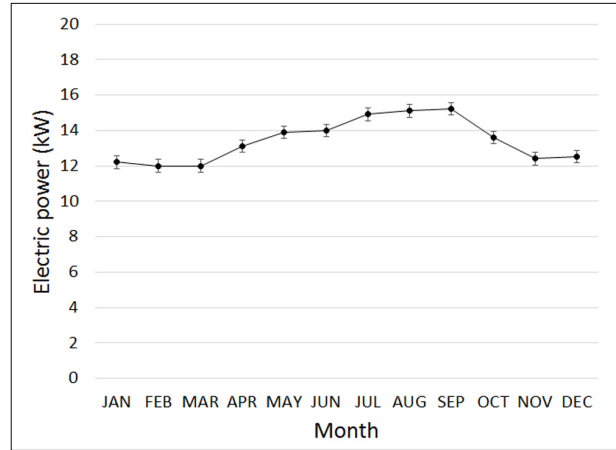


Fig. 5. Electric power for photovoltaic PCS of 20 kW.

이 최고 온도를 보였다. AC 차단부는 수용가가 연결되어 있으므로 PCS의 과전류 발생 시에 이를 차단해 주는 역할이므로 설계 시에 신뢰도가 높은 차단기를 선정해야 한다. Fig. 4는 6개의 구성부품에 대한 1년간의 측정온도를 나타내었다. Fig. 5는 1년간 태양광 발전으로 인한 전력을 나타내었다.

3.3 고장모드영향분석

FMD(Failure modes/mechanism distributions) 2016을 바탕으로 잠재적 고장모드를 도출하였으며, 부품별 잠재적 고장모드 분석을 기초로 잠재적 원인 및 효과를

Table 4. FMEA worksheet

Item no.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	S E V	O C C	D E T	R P N
100 MCCB(DC/AC)							
101	No operation	Faulty switch, damages to structural parts, flashover/arc, improper maintenance, aging	No disconnection, safety, fire, arcs	5	4	1	20
102	Opens without command	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	No energy output	5	4	1	20
103	Intermittent operation	Corrosion, improper installation, lightning damage	Reduced energy output, no energy output, thermal damage	5	4	2	40
104	Does not open	Faulty switch, damages to structural parts, flashover/arc, improper maintenance, aging	No disconnection, safety, fire, arcs	5	3	2	30
105	Mechanical failure	Damages, improper installation, disconnections, animals	Reduced energy output, no energy output	4	1	1	4
106	Degraded operation	Damages, improper installation, disconnections, animals	No disconnection, safety, fire, arcs	3	1	3	9
107	Induced	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	3	1	3	9
108	Induced failure	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	3	1	3	9
109	Contamination	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, high cell/ module temperature, damage from frame distortion, cleaning actions, animals, lightning, earthquake	Humidity/water/contaminant entrance, increased degradation, reduced energy output, no energy output	3	1	1	3
200 DC bus capacitor							
201	Cracked	Damages, improper installation, disconnections, animals	Reduced energy output, no energy output	2	2	1	4

Item no.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	S E V	O C C	D E T	R P N
300 Discharge resistor							
301	Improper output	Insulation breakdown, damages to structural parts, water/particles in oil, continuous overvoltage, shorting, lack of protective device, improper maintenance, aging	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	5	4	2	40
302	Binding/Sticking	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, damage from frame distortion, cleaning actions, animals, lightning	Humidity/water/contaminant entrance, increased degradation, reduced energy output, no energy output	4	1	4	16
303	Broken	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating, safety, arcs, fire	5	2	1	10
304	Cracked	Damages, improper installation, disconnections, animals	Reduced energy output, no energy output	4	2	1	8
305	Loose	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating, safety, arcs, fire	5	1	4	20
306	No output	Damage, disconnection, animals, pulled cables	No energy output	5	3	1	15
400 Resistor assembly							
401	Broken	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating, safety, arcs, fire	2	2	1	4
402	Loose	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating, safety, arcs, fire	5	1	4	20
403	Open	Damage, disconnection, animals, vandalism, strong wind, pulled cables	No energy output	5	1	1	5
500 IGBT							
501	Fail to operate (Fail to transfer)	Contact damage, card/board problem, software failure (within working conditions), ventilation obstruction, extreme weather conditions	No energy output	5	4	1	20
502	Bearing failure (Parameter change)	Failure of tap changer, damages to structural parts, improper maintenance, aging	Loss of efficiency, improper energy output	3	2	2	12
503	Erratic operation	Insulation breakdown, damages to structural parts, water/particles in oil, transient overvoltage disturbance, continuous overvoltage, shorting, lack of protective device, improper maintenance, aging	Reduced energy output transformer	3	2	2	12
504	Degraded output	MPPT unbalance, extreme weather conditions, improper design	Reduced energy output Transformer	4	4	3	48
505	Improper output	Insulation breakdown, damages to structural parts, water/particles in oil, transient overvoltage disturbance, continuous overvoltage, shorting, lack of protective device, improper maintenance, aging	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	5	2	1	10
506	No output(Open)	Lightning, earthquake, explosion, exposure to non-electric fire/burning, shorting, aging	No energy output	5	2	1	10
507	Worn(Short)	Insulation breakdown, damages to structural parts, water/particles in oil, continuous overvoltage, shorting, lack of protective device, improper maintenance, aging	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	4	2	2	16
600 Inductor							
601	Alignment improper	Bad system configuration, construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating, safety, arcs, fire	4	2	2	16

분석하였으며, 구성부품에 대한 위험우선순위의 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 고장의 잠재적 원인은 전문가들의 의견과 미국의 BNL에서 제시된 데이터 및 신재생에너지에서 분석한 자료를 바탕으로 하였다. 잠재적 효과는 첫째 불안정한 전력 공급(출력 에너지), 둘째 기계적 손상, 셋째는 안전사고를 바탕으로 하였다^{8,10)}. 본 연구에서는 각 구성 부품에 대한 위험우선순위를 최대 125까지 책정될 수 있으나 본 연구에서 분석한 결과 최고 48로 도출되어 48이 포함된 등급까지

만 본 논문에서 언급하였으며, 그 이상의 등급인 중대한 위험과 허용불가 위험에 대해서는 무시하였다. 또한 파레토 커브(Pareto's curve)의 특성에서 상위 10%의 대책에 의해 대상 시스템의 신뢰성을 80% 이상 개선 가능한 것으로 많이 알려져 있기 때문에 상위 10%에 대한 고장모드를 집중 분석하였다¹²⁾. 상위 10%에 해당되는 고장모드는 MCCB의 간헐적 작동(Item No. 103), 방전저항의 부적합한 출력(Item No. 301), IGBT의 저하된 출력(Item No. 504)로 나타났다.

4. 결론

본 논문은 20 kW이하의 태양광발전 PCS의 구성부품에 대한 열적특성을 분석하여 1년간 데이터를 확보하였고, FMEA를 통하여 상위 10%의 위험우선순위를 도출하였다. 열적특성과 위험우선순위를 분석하여 PCS에서 구성 부품에 대한 설계방안을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 방전저항에서 125℃로 열이 발생되었고, 방전저항의 열이 금속기판 뒷면에 설치되어 있는 IGBT에 영향을 미치고 있었다. 방전저항의 열이 IGBT에 영향을 주지 않도록 방전저항 설계 시 방열판 또는 난연 판넬을 추가하여 금속기판에 열이 전도되지 않도록 설계하는 것이 바람직하다.

2) 위험우선순위 상위 10%에 해당되는 고장모드는 MCCB의 간헐적 작동(Item No. 103), 방전저항의 부적합한 출력(Item No. 301), IGBT의 저하된 출력(Item No. 504)으로 나타났다. 잠재 원인으로는 MCCB의 간헐적 작동은 부식이나 잘못된 설치로 나타났으며, 방전저항의 경우는 과전압, 노후 및 부적합한 설치로 나타났다. IGBT는 부적합한 설계 또는 MPPT의 불안정이 원인이었다. 20 kW이하의 PCS는 소형으로 제작되기 때문에 설치의 편리성을 고려하여 부품의 모양을 보고 설계를 한다. 따라서 설치의 편리성보다는 상시 높은 열을 발생할 수 있는 부품에 대한 이격거리 설정, 방열 또는 환기팬 등을 통한 열을 방출할 수 있는 구조 등의 안전성을 고려한 설계가 필요하다.

감사의 글 : 본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2017년도 중소기업기술혁신개발사업(S2475538)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- 1) Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 8th Framework Plan for Power Supply", pp.48-55, 2017.
- 2) D. H. Kim, S. C. Kim, J. S. Park, E. J. Kim and E. S. Kim, "Analysis of Risk Priority Number for Grid-connected Energy Storage System", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 2, pp.1-8, 2016.
- 3) D. S. Park, Reduction Plan of Electrical Fire through Analysis of the Electric Failure and Accident Cases and Application of ETA in PV System, Graduate School, Chungbuk National University, pp.28-29, 2016.
- 4) D. H. Kim, S. C. Kim, E. S. Kim and Y. H. Park, "Risk Assessment of Energy Storage System Using Event Tree Analysis", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp.34-41, 2016.
- 5) A. Colli, "Extending Performance and Evaluation Risks of PV Systems Failure Using a Fault Tree and Event Tree Approach: Analysis of the Possible Application", presented at the 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 2012.
- 6) R. Freancis and A. Colli, "Information-Based Reliability Weighting for Failure Mode Prioritization in Photovoltaic (PV) Module Design, Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12, 2014.
- 7) M. Catelini, L. Ciani and E. Simoni, "Thermal Analysis of Critical Components in Photovoltaic Inverter", IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp.1891-1595, 2012.
- 8) D. H. Kim, S. C. Kim, J. S. Park, E. J. Kim and E. S. Kim, "Analysis of Risk Priority Number for Grid-connected Energy Storage System", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 2, pp.10-17, 2016.
- 9) I. S. Song, Quality Bible ; FMEA, pp.96-99, 2014.
- 10) INTERNATIONAL SEMATECH, Failure Mode and Effects Analysis(FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry, 1992.
- 11) Z. J. Ma and S. Thomas, "Reliability and Maintainability in Photovoltaic Inverter Design", Reliability and Maintainability Symposium, 2011.
- 12) KOSHA, "A Study on Development of Evaluation Model for Reliability and Safety of Temporary Electric Power Installations" pp.31-32, 2003.