

FTA를 적용한 태양광 발전 및 ESS 연계형 PCS의 안전성 평가

김두현* · 김성철**† · 김의식*** · 남기공**** · 정천기****

Safety Assessment for PCS of Photovoltaic and Energy Storage System Applying FTA

Doo-Hyun Kim* · Sung-Chul Kim**† · Eui-Sik Kim*** · Ki-Gong Nam**** · Cheon-Kee Jeong****

†Corresponding Author

Sung-Chul Kim
Tel : +82-43-267-2463
E-mail : ksc3650@naver.com

Received : November 30, 2018

Revised : January 18, 2019

Accepted : January 30, 2019

Abstract : This paper presents a safety assessment based approach for the safe operation for PCS(Power Conditioning System) of photovoltaic and energy storage systems, applying FTA. The approach established top events as power outage and a failure likely to cause the largest damage among the potential risks of PCS. Then the Minimal Cut Set (MCS) and the importance of basic events were analyzed for implementing risk assessment. To cope with the objects, the components and their functions of PCS were categorized. To calculate the MCS frequency based on IEEE J Photovolt 2013, IEEE Std. 493-2007 and RAC (EPRD, NPRD), the failure rate and failure mode were produced regarding the basic events. In order to analyze the top event of failure and power outage, it was assumed that failures occurred in DC breaker, AC breaker, SMPS, DC filter, Inverter, CT, PT, DSP board, HMI, AC reactor, MC and EMI filter and Fault Tree was drawn. It is expected that the MCS and the importance of basic event resulting from this study will help find and remove the causes of failure and power outage in PCS for efficient safety management.

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : PCS(power conditioning system), safety assessment, failure rate, MCS (minimal cut set), FTA(fault tree analysis)

1. 서론

태양광발전사업 및 ESS는 정부의 신재생에너지 확산 정책에 의한 지원으로 가파르게 증가하고 있으며 아울러 평균 10~15%의 고수익률을 보이고 있다. 이로 인해 많은 기업, 개인 등의 사업자들이 태양광발전사업 및 ESS에 뛰어 들고 있고 발전량의 크기로 구분하여 다양한 규모로 설치 운영되고 있는 것이 국내의 실정이다¹⁾. 이렇듯 태양광발전사업 및 ESS는 긍정적 측면이 많은 것이 사실이나 한편으로는 많은 문제점을 안고 있기도 하다. 이런 문제점은 환경적 문제, 금전적 문제, 운영상의 문제점으로 구분할 수 있다¹⁻³⁾. 이 중에서도 가장 시급한 문제는 바로 운영상의 문제인데, 태

양광발전설비 및 ESS는 한번 설치하면 10년 또는 20년간 안정적으로 운영된다고 판단하고 있는 것이 일반적이나 현실은 그렇지 않다²⁻³⁾.

태양광 발전설비 및 ESS 설비의 전반으로 안전이 중요하다 그 중 가장 중요한 설비는 PCS(Power condition system)이다. PCS가 운전을 개시한 다음에 안정적으로 가동을 하기 위하여 설비의 안정성 측면 뿐 아니라 운용의 안정성 측면에서의 대책을 위한 투자 및 연구가 필요하다⁴⁻⁵⁾. 그럼에도 불구하고 현재의 PCS에 대한 연구는 설비의 성능 및 운용의 효율 측면에 주로 국한되어 있다. 따라서 운용의 안정성 측면에서의 연구가 매우 필요하며, 특히 PCS를 구성하고 있는 개개의 부품 또는 시스템 전체에 대하여 예상되는 중요

*충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

**충북대학교 안전공학과 초빙교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

***대한산업안전협회 과장 (Korea Industrial Safety Association)

****다아이케이(주) 이사 (DIK CO., LTD.)

고장 및 사고의 원인에 대한 파악은 매우 중요하다. 또한 사고 원인을 제거하기 위한 우선순위의 설정과 이들을 합리적으로 관리하기 위해서는 명확하고 구체적인 관리기준이 필요함에도 현실에서는 무시되고 있다. 따라서 PCS의 높은 신뢰성과 장기간의 안정적 운영을 위해서는 개개 구성부품의 고장률, 고장모드 및 사고유형을 분석할 수 있는 시스템안전성 평가기법을 적용하여, 위험요소를 발굴하고 이를 관리하는 것이 필요하다.

이를 위해서는 PCS의 구성부품 상호간의 관계와 영향에 의해 최종 고장으로 이르게 하는 과정을 제시할 수 있는 평가기법을 필요로 한다. 구성부품 상호간의 관계 파악, 관계로 인하여 발생할 수 있는 위험요소의 상호작용, 관계로부터 최소로 발생 가능한 위험요소를 찾을 수 있는 기법으로 결합수 분석(FTA; Fault Tree Analysis)이 있다⁶⁾. PCS의 방대한 부품과 다양한 설비들의 조합으로 이루어져 이러한 설비에서 발생하는 사고는 그 원인이 여러 경로에 걸쳐 복합적으로 나타나기에 설비에서의 복잡한 인과관계를 분석하기 위해서는 결합수분석을 적용하는 것이 용이하다. 특히 결합수분석의 나무(Tree)는 정상사상(Top event)이라고 부르는 바람직하지 않는 사상을 시작으로 그 발생원인이나 그 사상에 기여하는 조건들이나 요인들을 찾아 시간적 흐름을 거슬러 분석해 가는 연역적 구조이므로, PCS에서 발생하는 사고의 원인 분석을 통한 안전성의 확보에 적합하다⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 PCS에서 결합수분석을 통한 안전성을 평가하기 위하여 시스템의 구성부품에 대하여 16개 항목으로 분류하였고, IEEE J Photovolt 2013⁷⁾, IEEE Std. 493-2007⁸⁾ 및 RAC⁹⁾을 바탕으로 고장률과 기본사상(Basic event)을 도출하였다. 또한 보편적인 PCS의 회로도를 구축하고, 고장에 대한 기능적 및 잠재적 고장의 원인에 대한 결합수(FT)를 작성하고 분석하였다. PCS 시스템의 바람직하지 않은 사건인 고장을 정상사상으로 두고 정량적 분석을 실시하여 고장을 발생시킬 수 있는 최소절단집합(MCS)을 도출하고 최소절단집합과 기본사상의 중요도를 분석하였으며, 이를 통해 중요사상들의 원인에 대하여 철저한 관리를 함으로써 PCS를 안정하게 운영할 수 있을 것이다.

2. PCS의 구조 및 안정적 운영 방안

2.1. PCS의 구조

PCS는 태양광의 Solar Cell Array와 ESS의 발생된 DC를 AC로 변환하여 부하 및 전력계통에 전력을 공

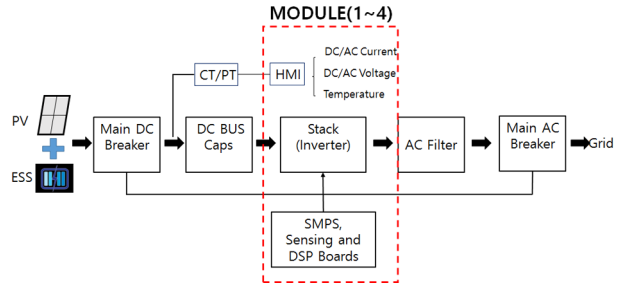


Fig. 1. Functional classification for module PCS.

급하는 역할을 수행한다. 태양광 발전 시스템은 Solar Cell Array와 ESS에서 많은 양의 발전이 이루어졌더라도 PCS에서 정상적으로 출력을 하지 못하면 아무 소용이 없기 때문에, PCS의 유지보수와 고장이 일어났을 때 Downtime의 감소가 관건이다. Downtime은 고장으로 인하여 시스템이 작동하지 않는 시간을 말하며, 메이커들은 이러한 Downtime을 단축하기 위하여 PCS의 내부에 탑재되는 핵심 부품들을 모듈형으로 전환하는 추세이다. PCS를 모듈형태로 제작함으로써 시스템의 Downtime을 줄이고 가동효율을 높일 수 있다. 모듈형 PCS의 주요 구성은 Fig. 1에 제시하였다.

대부분의 PCS는 DC breaker, DC capacitor (Amorphous core), Stack(inverter), AC filter(AC reactor, EMI filter), AC breaker로 하나의 통합시스템이 연결되어 있다. 반면 모듈형 PCS라 함은 Fig. 1처럼 Stack부분을 캡슐로 설계화한 구조를 말한다. 본 연구에서는 하나의 통합된 시스템인 PCS를 바탕으로 결합수 분석을 하였다. Fig. 1은 PCS의 통합형태 또는 모듈형의 구조를 나타내었다.

2.2. 안정적 운영방안

PCS의 안정적 운영을 위한 안전제어체계는 차단장치뿐 아니라 안전관리자(Technician, Grid operator)의 역할도 요구되며, Fig. 2에 나타내었다.

안전관리자는 현장안전관리자(Technician)와 계통안전관리자(Grid operator)가 있으며, 현장안전관리자는 PV string, BMS, PCS에 대하여 현장방문 또는 통신을 통한 모니터링 소프트웨어(HMI; Human-machine interface)를 바탕으로 이상유무를 확인하며, 계통안전관리자는 현장안전관리자 또는 원격감시제어(SCADA ; Supervisory control and data acquisition)를 통하여 이상 유무를 관리하고 있다. 대부분의 안전관리자는 육안검사, 모니터링 소프트웨어와 원격감시제어를 의존하고 있다. PCS의 에너지와 데이터(통신) 전송에 문제가 발생할 경우에 이를 발견하고 조치를 취함으로써 안정적 운용이 가능하다¹⁰⁻¹¹⁾. Fig. 2는 PCS의 안정적 운영 시스템을 나타내었다.

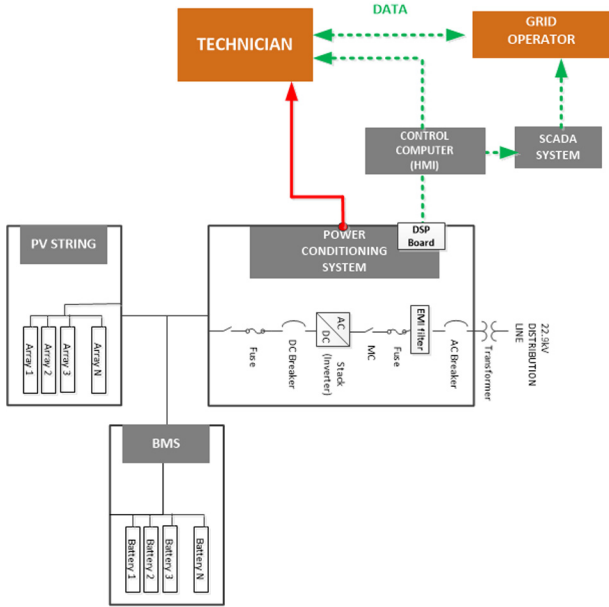


Fig. 2. Safety control structure of PCS.

3. 결함수 분석

3.1. FTA 분석 절차 및 방법

FTA의 분석절차는 분석 목적이나 분석 수준에 따라 다르지만 통상 Fig. 3과 같은 순서에 따른다. 즉, 1) 정상사상의 선정, 2) 사상별 재해 원인, 요인 규명, 3) FT(Fault tree) 작성 및 분석, 4) MCS 및 중요도를 측정하고 분석 등의 4단계이다.

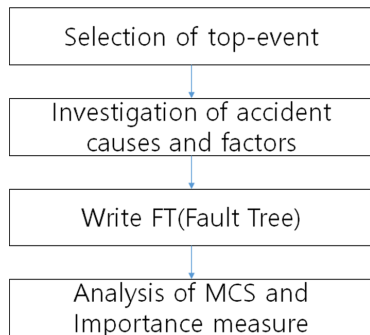


Fig. 3. Sequence of FTA.

3.2. PCS의 작동원리 및 고장 시나리오

PCS 모델링을 위하여 안전관리자가 육안검사, 모니터링 소프트웨어와 원격감시제어를 통하여 확인하는 방법을 채택하였는데 이는 에너지 관점, 데이터 관점, 전원 공급 관점으로 분류할 수 있다.

Fig. 4의 에너지 관점은 태양광 또는 ESS에서 입력되는 에너지(Power)에 해당되며 전체적인 회로도에서 DC

는 DC Breaker와 Amorphus core를 통하여 Stack(Inverter)로 흐르게 된다. 여기서 DC Breaker는 입력되는 에너지와 PCS를 연결하거나 분리하는 스위치로 작동하며, Amorphus core는 DC 입력의 리플(ripple)을 감소시키는 역할을 수행한다. 또한 Stack(Inverter)은 DC를 AC로 변환하며, AC Reactor와 AC Breaker를 통해 계통(Grid)에 AC를 공급한다. 여기서 AC Reactor는 Inverter의 높은 스위칭 주파수에 의해 생성된 고조파 성분을 걸러내는 역할을 하며, AC Breaker는 계통과 PCS를 분리하는 스위치로 작동한다. 에너지 입출력과정에서 개개의 구성 부품에 문제가 발생할 수 있고 시스템 전반에 문제가 발생할 수 있다. 에너지 관점은 PCS의 입력에 해당되는 DC Breaker와 최종출력인 AC Breaker 간의 에너지 흐름도를 분석하여야 한다.

Fig. 4의 데이터 관점은 입력 부분에서 데이터(Data)에 해당되며 태양광 또는 ESS에서 입력되는 신호에 대하여 CT/PT에서 이를 감지한다. 입력 데이터에서의 CT/PT 신호와 Stack(Inverter)에서 발생된 Grid CT/PT 데이터는 센싱보드(Sensing board)를 통하여 DSP board(Digital signal processor board)에 전달된다. DSP board에서 전달되는 데이터에 대하여 다시 Stack(Inverter)과 HMI에 전달되며 최종 관리자에게 데이터가 보고된다.

Fig. 4의 전원 공급 관점은 반도체소자들의 전원에 해당되며 CT/PT, DSP board, HMI를 구동시키는 전압 공급장치(SMPS ; Switched-mode power supply)를 나타내었다.

PCS에 발생할 수 있는 고장 및 그 원인은 매우 다양하나, 본 연구에서는 이를 단순화하여 부품 또는 모듈 고장 등으로 인한 에너지 출력 감소, 데이터 입출력 실패로 인한 고장이 동시에 발생하는 경우를 정상사상으로 간주하였다. 에너지 출력 감소는 Fig. 4에서 제시한 에너지 관점을 바탕으로 하였고, 데이터 입출력 실패는 데이터 관점을 바탕으로 고장 시나리오를 제시하였다. Fig. 4는 PCS 모델링을 위한 구성도를 나타내었다.

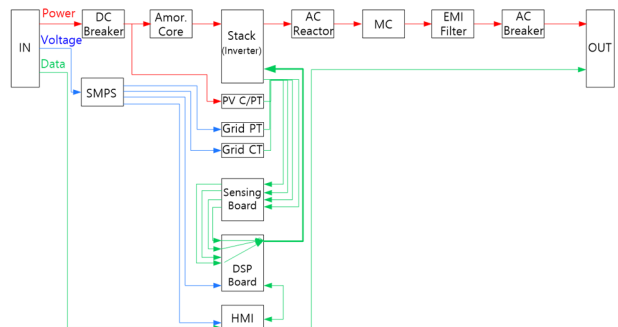


Fig. 4. Consist of modeling for PCS.

3.3. FT 작성

결함수(FT)를 작성하면서 기본사상의 고장률 및 확률밀도함수는 지수분포를 따르는 것으로 가정하였고 각각의 기본사상은 통계적으로 상호 독립적으로 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 시스템 운영 중에는 수리에 의한 보수는 없는 것으로 가정하였다. 본 연구의 원래 목적에 부합하기 위해 인간과오에 의한 운전상의 실수 역시 고려하지 않고 결함수(FT)를 전개하였다. 결함수(FT)는 Fig. 4의 PCS 모델링을 위한 구성을 근간으로 하여 정량적인 분석을 실시하였다. 신뢰성 있는 정량 평가를 위해서는 고장률 데이터 확보가 중요한데 잠재고장원인 및 고장률은 IEEE J Photovolt 2013, IEEE Std. 493-2007 및 RAC 등을 통하여 수집한 고장모드와 고장률 중에 PCS 특성에 가장 적합한 고장률을 선택하여 반영하였다. 잠재고장원인과 고장률을 바탕으로 정량적 평가를 하고 도출된 결과를 통해 PCS의 선택적 관리가 가능하고, 또한 고장이나 예측 가능한 사고에 대하여 해당 구성부품 및 PCS 작동별 위험요소를 제거함으로써 타 시스템으로의 파급사고를 막을 수 있다.

Table 1. Basic event data of PCS

Components	Basic event/ID code	Description	Prob.
DC Breaker	B1001 DC_breaker_NO	No operation	2.35E-07
	B1002 DC_breaker_OWS	Open without stimuli	2.58E-08
AC Breaker	B1003 AC_breaker_NO	No operation	2.35E-07
	B1004 AC_breaker_OWS	Open without stimuli	2.58E-08
SMPS	B2001 SMPS_IO	Improper Output	3.41E-06
	B2002 SMPS_NO	No Output	4.04E-07
Amor. Core	B3001 Amor_IO	Improper Output	2.60E-06
Stack (Inverter)	B4001 Stack_FTO	Fail to Operate	4.87E-05
	B4002 Stack_BF	Bearing Failure	2.43E-05
	B4003 Stack_EO	Erratic Operation	2.43E-05
PV CT	B5001 PVCT_S	Shorted	7.80E-07
	B5002 PVCT_O	Opened	2.13E-07
PV PT	B5003 PVPT_S	Shorted	7.80E-07
	B5004 PVPT_O	Opened	2.13E-07
GRID CT	B5005 GRIDCT_S	Shorted	7.80E-07
	B5006 GRIDCT_O	Opened	2.13E-07
GRID PT	B5007 GRIDPT_S	Shorted	7.80E-07
	B5008 GRIDPT_O	Opened	2.13E-07
Sensing Board	B6001 SB_C	Cracked	1.06E-06
	B6002 SB_B	Broken	5.34E-07
DSP board	B7001 DSP_PF	Parametric Failure	1.08E-06
	B7002 DSP_MF	Mechanical Failure	2.98E-06
	B7003 DSP_FF	Functional Failure	3.46E-06
HMI	B8001 HMI_UITE	Unable to Execute	5.45E-06
	B9001 ACRV_VD	Vendor Defect	1.43E-06
AC Reactor	B9002 ACRe_EF	Electrical Failure	7.12E-06
	MC	B1101 MC_I	Intermittent
		MC_IO	Improper Output
EMI Filter(C)	B1201 EMI_C	Cracked	2.31E-06
EMI Filter(L)	B1202 EMI_AI	Alignment Improper	4.29E-06

또한 기본사상 및 게이트에 분류코드를 부여하여 해당 사상의 고장 형태를 쉽게 파악 가능하도록 하였다. 기본사상 중 중복되는 사상의 경우는 해당 구성 부품에서 발생하는 기초사상으로 이는 식별자(ID Code)를 구분하여 첨부하였다. Table 1은 PCS의 기본사상을 나타내었다.

PCS에 바람직하지 않는 사건인 고장 및 화재를 정상사상으로 하고 에너지(Low power)와 데이터(Low data)의 고장을 중간사상으로 하여 그 발생원인, 기여 조건 및 요인들을 분석함에 있어서 신뢰성분석프로그램인 PTC Windchill Quality Solutions과 AIMS-PSA를 사용하였다. 중간사상에 대하여 에너지 및 데이터의 입출력의 작동순서를 확인하고 이들의 대응 상태에 따라 추가적으로 발생할 수 있는 사고를 예측하였으며 전반적으로 분석의 신뢰성을 높였다. 이를 FT로 도식화하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5 a)는 PCS의 고장 및 화재를 정상사상으로 간주하고 중간사상을 에너지 관점(Low power)과 데이터 관점(Low data)의 고장으로 분류하였다. Fig. 5 b)는 에너지 관점으로 AC breaker의 고장과 EMI Filter의 고장으로 하였다. EMI Filter의 고장은 커패시터와 리액터의 고장으로 하였다. 리액터의 고장은 리액터 자체의 고장과 리액터에 에너지가 연결되어 있는 MC(Magnetic contactor)의 고장으로 하였다. MC는 MC 자체의 고장과 MC와 접속되어 있는 AC reactor의 고장으로 하였다. Fig. 5 c)는 AC reactor의 고장을 정상사상으로 간주하고 나타낸 FT도이다. 이는 AC reactor의 자체의 고장과 Stack(Inverter)의 고장으로 하였다. 또한 Stack 자체의 고장과 아몰퍼스 필터의 고장, 최종 입력인 DC breaker의 고장으로 하였다.

Fig. 5 d)는 데이터(Low data)를 정상사상으로 하였고, Stack board의 고장에서 SMPS의 고장과 DSP board의 고장으로 하였다. SMPS는 부적합한 출력과 미출력을 기본사상으로 하였고, DSP board의 고장은 DSP board 자체의 고장과 Sensing board의 고장으로 하였다.

Fig. 5 e)는 Sensing board의 고장을 정상사상으로 하였고, Sensing board에 전기적 신호를 감지하는 CT와 PT의 고장으로 하였다.

Fig. 5 f)는 Sensing board의 CT의 고장을 정상사상으로 하였고 다시 PV CT의 고장과 계통 CT의 고장으로 구분하였고 각각을 기본사상으로 제시하였다. Fig. 5 g)는 Sensing board의 PT의 고장을 정상사상으로 하였고 다시 PV PT의 고장과 계통 PT의 고장으로 구분하였고 각각의 기본사상을 제시하였다. Fig. 5에서 제시되는 정상사상 및 주요 중간사상을 포함한 논리 게이트의 총수

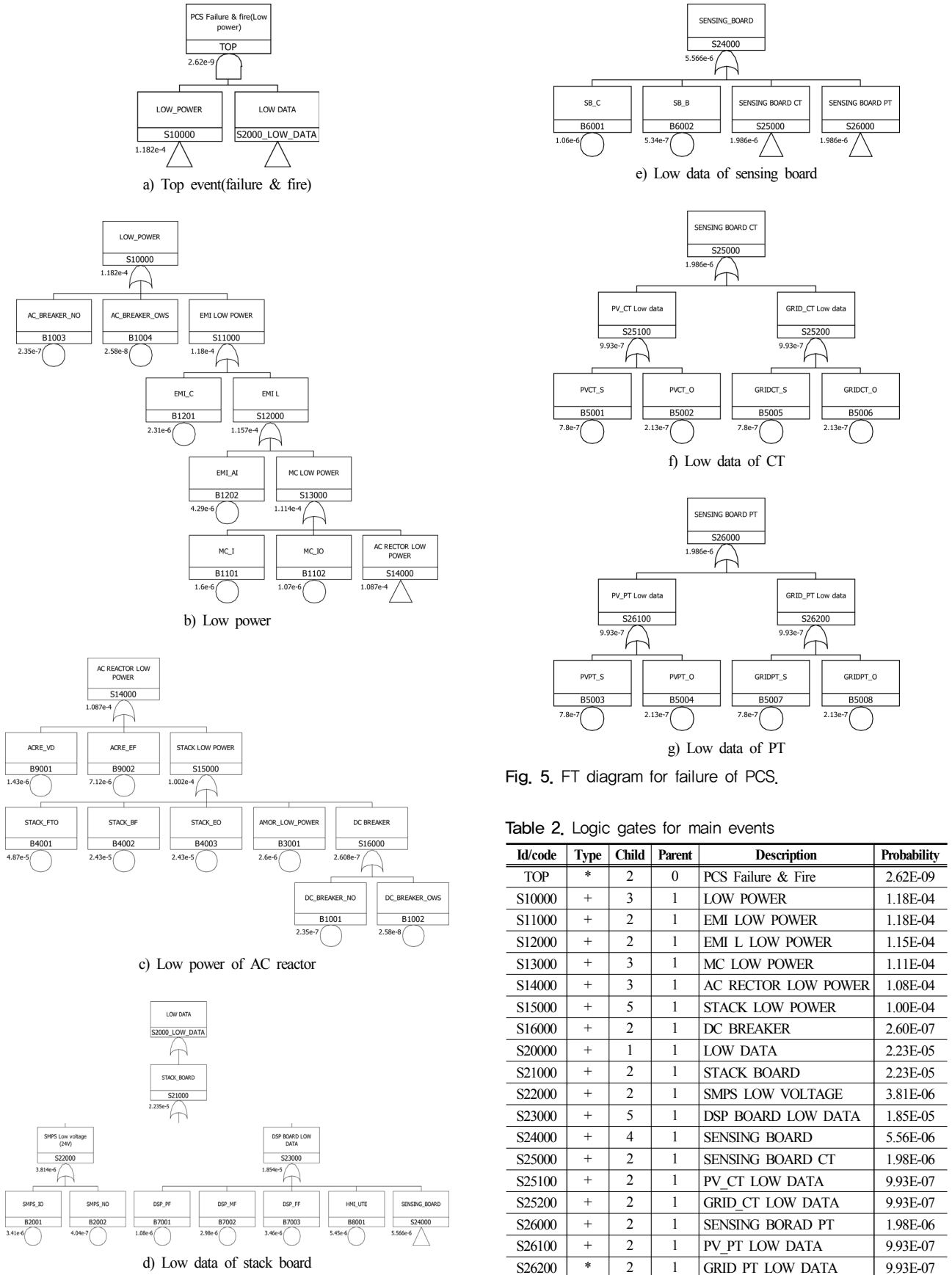


Fig. 5. FT diagram for failure of PCS.

Table 2. Logic gates for main events

Id/code	Type	Child	Parent	Description	Probability
TOP	*	2	0	PCS Failure & Fire	2.62E-09
S10000	+	3	1	LOW POWER	1.18E-04
S11000	+	2	1	EMI LOW POWER	1.18E-04
S12000	+	2	1	EMI L LOW POWER	1.15E-04
S13000	+	3	1	MC LOW POWER	1.11E-04
S14000	+	3	1	AC RECTOR LOW POWER	1.08E-04
S15000	+	5	1	STACK LOW POWER	1.00E-04
S16000	+	2	1	DC BREAKER	2.60E-07
S20000	+	1	1	LOW DATA	2.23E-05
S21000	+	2	1	STACK BOARD	2.23E-05
S22000	+	2	1	SMPS LOW VOLTAGE	3.81E-06
S23000	+	5	1	DSP BOARD LOW DATA	1.85E-05
S24000	+	4	1	SENSING BOARD	5.56E-06
S25000	+	2	1	SENSING BOARD CT	1.98E-06
S25100	+	2	1	PV_CT LOW DATA	9.93E-07
S25200	+	2	1	GRID_CT LOW DATA	9.93E-07
S26000	+	2	1	SENSING BOARD PT	1.98E-06
S26100	+	2	1	PV_PT LOW DATA	9.93E-07
S26200	*	2	1	GRID_PT LOW DATA	9.93E-07

는 19개로 나타났으며 사상별 게이트 형식과 정보는 Table 2와 같다.

3.4. 중요도 측정

결함수분석을 위해서는 최소절단집합과 기본사상의 중요도를 도출하는 것이 바람직하다. Table 3에 제시한 PCS의 중요도는 FV 중요도(FV importance ; Fussell Vesely importance), 위험도감소가치(RRW; Risk reduction worth), 위험도달성가치(RAW; Risk achievement worth)로 구분할 수 있다. FV 중요도는 부품 또는 시스템에 나타난 특정 고장의 리스크가 전체 리스크에서 차지하는 비율을 나타내는데 특정 사상을 포함한 최소절단집합의 발생 확률 합을 정상사상의 발생 확률로 나눈 값을 말한다. RRW는 부품 또는 시스템을 개선할 경우 리스크 감소 효과를 나타낸다. 즉, 특정 사상이 발생하지 않는다고 가정할 때 감소하는 리스크의 확률을 말한다. RAW는 부품 또는 시스템이 사용 불능 상태가 될 때 리스크 증가 효과를 나타내는데 특정 사상이 반드시 발생한다고 가정할 때 증가하는 리스크의 확률을 말한다¹²⁾.

Table 3. Importance measure for PCS

Importance measure	Description
FV (Fussell Vesely) importance	The overall percent contribution of cut sets containing a basic event of interest to the total risk
RRW (Risk Reduction Worth) importance	The amount that the total risk would decrease if a basic event's failure probability were 0
RAW (Risk Achievement Worth) importance	The amount that the total risk would increase if a basic event's failure probability were 1

3.4.1. 최소절단집합(MCS; Minimal Cut Sets)의 중요도

최소절단집합의 중요도는 고장을 발생시킬 수 있는 기본 사상들의 조합과 도출된 최소절단집합 조합의 크기 확인을 가능하게 하며, 또한 중요도에 따라 우선순위 결정도 가능하게 한다. Table 4는 도출된 최소절단집합 48개 중 20개를 FV 중요도 순으로 나타내었다. 도출된 최소절단집합들을 살펴보면 에너지 또는 데이터 고장이 발생할 수 있는 모든 사상의 조합을 확인할 수가 있다. 하나의 최소절단집합에 포함되는 기본사상들이 동시에 발생한다면 정상사상인 고장이 발생하게 된다. 고장이 발생하기 위해서는 최소 2개 이상의 결함이 동시에 발생되어야 한다. Table 4에서 1번(NO 1) ~ 8번(NO 8) 사상의 중요도 누적값인 0.5089는 이들 고장 확률이 PCS 고장 확률의 50.8%를 차지하는 것을 의미한다. 또한 1번의 최소절단집합(인버터의 작동실패(B4001), HMI의 실행 불능(B8001))의 FV중요도가 0.1146라는 것은 1번의 최소절단집합이 전체 고장의

Table 4. Minimal cut sets in PCS

No.	Value	F-V	Acc.	BE#1	BE#2
1	2.65E-10	0.1146	0.1146	B4001	B8001
2	1.69E-10	0.0727	0.1874	B4001	B7003
3	1.66E-10	0.0717	0.2591	B4001	B2001
4	1.45E-10	0.0626	0.3218	B4001	B7002
5	1.32E-10	0.0572	0.3790	B4002	B8001
6	1.32E-10	0.0572	0.4362	B4003	B8001
7	8.41E-11	0.0363	0.4726	B4003	B7003
8	8.41E-11	0.0363	0.5089	B4002	B7003
9	8.29E-11	0.0357	0.5447	B4002	B2001
10	8.29E-11	0.0357	0.5805	B4003	B2001
11	7.24E-11	0.0312	0.6117	B4002	B7002
12	7.24E-11	0.0312	0.6430	B4003	B7002
13	5.26E-11	0.0227	0.6657	B4001	B7001
14	5.16E-11	0.0222	0.6880	B4001	B6001
15	3.88E-11	0.0167	0.7048	B9002	B8001
16	3.80E-11	0.0164	0.7212	B4001	B5005
17	3.80E-11	0.0164	0.7376	B4001	B5001
18	3.80E-11	0.0164	0.7540	B4001	B5007
19	3.80E-11	0.0164	0.7704	B4001	B5003
20	2.62E-11	0.0113	0.7818	B4002	B7001

11.46%를 차지함을 의미한다. 이는 최소절단집합만으로 PCS의 고장에서 중요한 것이 무엇인지 추측할 수 있으며 만일 시스템의 개선이 필요하다면 어느 부분을 개선하는 것이 효과적인지 파악할 수 있다. Table 4는 PCS의 최소절단집합을 나타내었다. 여기서 BE#1(Basic event 1)과 BE#2(Basic event 2)는 최소절단집합에 해당되는 기본사상을 나타내었다.

3.4.2. 기본사상의 중요도

기본사상의 중요도 분석은 기본사상의 고장이 PCS 신뢰도에 미치는 영향을 평가하며, 이를 통해 효과적인 PCS 신뢰도 향상 방안을 도출할 수 있다. 중요도를 기준으로 시스템의 우선 개선 대상 사상을 도출하고 PCS 고장 발생을 감소하는 방안을 강구하여 신뢰도를 향상한다. 시스템 전체 리스크에서 해당 기본사상이 차지하는 비율인 FV 중요도와 해당사상이 개선될 경우, 리스크 감소효과를 나타내는 RRW와 특정사상이 고장으로 사용 불능이 되었을 때의 리스크 증가 효과를 나타내는 RAW를 Table 5에 기본사상 별로 제시하였다.

FV중요도로 RRW는 인버터의 작동실패(B4001)가 가장 높았으며, RAW는 HMI의 고장(B8001)이 가장 높게 나타났다.

Table 5. Basic event of PCS

No	Event	Proba.	FV	RRW	RAW
1	B4001	4.87E-05	0.47018	1.88743	9,655
2	B8001	5.45E-06	0.26749	1.36517	49,081
3	B4002	2.43E-05	0.22142	1.28439	9,112
4	B4003	2.43E-05	0.22142	1.28439	9,112
5	B7003	3.46E-06	0.16248	1.19400	46,960
6	B2001	3.41E-06	0.16013	1.19066	46,960
7	B7002	2.98E-06	0.13994	1.16271	46,960
8	B9002	7.12E-06	0.04705	1.04938	6,610
9	B7001	1.08E-06	0.04539	1.04755	42,032
10	B6001	1.06E-06	0.04455	1.04663	42,03
11	B5001	7.80E-07	0.03278	1.03389	42,032
12	B5005	7.80E-07	0.03278	1.03389	42,032
13	B5003	7.80E-07	0.03278	1.03389	42,032
14	B5007	7.80E-07	0.03278	1.03389	42,032
15	B1202	4.29E-06	0.02835	1.02918	6,610
16	B6002	5.34E-07	0.02244	1.02296	42,032
17	B2002	4.04E-07	0.00849	1.00857	21,038
18	B3001	2.60E-06	0.00612	1.00615	2,355
19	B1201	2.31E-06	0.00543	1.00546	2,355
20	B5002	2.13E-07	0.00448	1.00450	21,038
21	B5006	2.13E-07	0.00448	1.00450	21,038
22	B5004	2.13E-07	0.00448	1.00450	21,038
23	B5008	2.13E-07	0.00448	1.00450	21,038

4. 결론

본 연구에서는 PCS에 바람직하지 않는 사건인 고장 및 화재를 정상사상으로 하고 에너지(Low power)와 데이터(Low data)의 고장을 중간사상으로 하여 결함수(FT)를 작성하고 분석하였다. 또한 고장을 발생시킬 수 있는 최소절단집합(MCS)과 기본사상의 중요도를 도출하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 결함수분석을 이용하여 PCS의 안전성 평가가 가능하며 이를 토대로 부품 및 모듈별 고장을 정량적으로 분석하고 발생확률이 높은 부품 및 모듈에 대하여 관리를 함으로써 PCS의 신뢰성을 향상할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 도출된 최소절단집합 중에서 최소절단집합의 중요도 누적값(ACC)을 바탕으로 PCS 고장 확률의 50%를 차지하는 인버터와 HMI(통신고장)에서 발생하는 고장의 최소절단집합들에 포함되는 기본사상들에 대하여 집중적으로 관리함으로써 PCS를 효과적이고 안정적으로 운영할 수 있을 것으로 기대된다.

3. PCS의 부품 및 모듈을 더 세밀하게 분류하고 실제의 고장률 및 관련 자료를 이용하여 결함수 분석을 적용한다면 더 실용적이고 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되므로 추후 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20172020109050).

References

- 1) Y. B. Kim and D. H. Kim, "An Analysis of the Failure Modes Impacts in Grid-connected Photovoltaic Power Generation System below 20 kW", *Crisisonomy*, Vol. 12, No. 3, pp.157-167, 2016.
- 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. 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.
- 4) Hermann Laukamp, Georg Bopp, "PV Fire Hazard-Analysis and Assessment of Fire Incidents", 28th EU PVSEC, 2013.
- 5) Solar Power World, "Top 5 Points of Failure on Solar Systems and How to Correct Them", <https://www.solarpowerworldonline.com>, 2016.
- 6) H. K. Lim, *System Safety Engineering*, Hansol Academy, pp. 146-147, 2012.
- 7) A. Golnas, "PV System Reliability : An Operator's Perspective", *IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2*, 2013.
- 8) Power Systems Reliability Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee, *IEEE Industry Applications Society, IEEE Std. 493-2007 Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE-SA Standards Board, New York, NY, IEEE 493-2007.
- 9) Reliability Analysis Center, *Non-electronic Parts Reliability Data & Electronic Parts Reliability Data*, 2016.
- 10) A. Colli, "Failure Mode and Effect Analysis for Photovoltaic Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 804-909, 2015.
- 11) David Rosewater, "Energy Storage Hazard Analysis and Risk Management", Presentation to Senior Seminar, 2015.
- 12) K. Y. Kim, M. J. Hwang, D. E. Kang and Y. J. Eon "A Study on Importance Measures for Risk Informed Regulation & Applications", *KAERI, TR-2432*, pp. 1-9, 2003.