

ESS의 운용환경 및 용도를 고려한 사고유형별 안전성 평가에 관한 연구

이예빈, 이민행, 유현상, 정재범, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:yeab10@koreatech.ac.kr

A Study on Safety Evaluation by Fault Cases Considering Environments and Applications in ESS

Ye-Bin Lee, Min-Haeng Lee, Hyun-Sang You, Jae-Beom Jung, Dea-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 다양한 용도로 설치되는 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 지속적으로 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전성에 대한 우려가 증가하고 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 ESS의 위험도 평가지표를 구성요소, 용도, 운용환경, 전력계통 영향도의 4가지 요인으로 분류하여, 화재사고 원인 추정 및 위해요인을 도출하고자 한다. 여기서, ESS의 운용환경 및 용도를 고려한 사고유형별 안전성을 평가하기 위하여, 심각도, 발생도, 검출도를 고려한 위험우선순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부로 구성된 ESS의 사고평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 신재생 에너지 연계용 ESS가 운용환경에 가장 큰 영향을 받으며, DC 전로 단락 사고가 ESS의 안전성에 가장 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS의 안전성을 향상하기 위하여, 설치 위치와 형태, 보호기기의 유무 등, 주변 환경 및 용도에 대한 면밀한 검토가 요구됨을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장기본법의 시행되면서, 신재생 에너지의 출력 안정화, 피크 부하 저감 및 발전기 주파수 조정 등 다양한 기능을 가진 에너지저장장치의 설치가 증가하고 있다[1-2]. 하지만, 리튬이온배터리를 이용한 ESS의 화재사고는 2017년 8월 고창에서 발생한 전력연 구원의 화재 이후 현재까지 지속적으로 발생하고 있어, ESS의 안전성에 대한 우려가 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라, 정부는 ESS의 화재원인 파악과 안전성 평가를 위해, ESS 화재사고 원인조사를 통해 ESS의 위해요인 및 ESS의 운용 환경에 관한 원인을 추정하고 있다. 또한, 화재사고 원인추정에 기반한 위해요인 및 ESS의 IEC62933-5-2에 의한 ESS의 위험도 평가지표를 ESS의 구성요소, 시스템, 운용환경, 전력계통영향도로 분류하여, 화재사고 원인 추정 및 위해요인을 도출하고자 한다. 여기서, ESS의 구성요소의 평가지표는 PCS, 배터리, 보호장치로 구성되고, 운용환경의 평가지표는 온습도 내력, 절연저항 내력, 배터리 열화, BMS 운용 내력으로 구성

된다. 또한, ESS 시스템 측면의 평가지표는 설치타입, 용도, 소방설비 설치여부, 오프가스 검출장치 설치여부, 안전장치 설치여부로 구성되며, 전력계통 영향도 평가지표는 사고전류, 누설전류, 서지, CMV, 순환전류 등이 있다.

따라서, 본 논문에서는 ESS의 운용환경 및 용도를 고려한 안전성을 평가하기 위하여, RPN 방식을 이용한 안전성 평가 방안을 제시하고, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부 배터리부로 구성된 ESS의 사고특성 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 시뮬레이션 및 안전성 평가를 수행한 결과, ESS의 운용환경이 배터리에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고, DC 전로 단락 사고가 ESS의 안전성에 가장 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS 운용 시 설치 위치와 형태, 보호기기의 유무 등, 주변 환경에 대한 면밀한 검토가 요구됨을 알 수 있다.

2. ESS의 사고사례 분석

ESS의 화재사고는 2017년 고창 전력시험센터를 시작으로 2023년 4월까지 총 40건의 사고가 발생하여, ESS의 시장과

사업자들에게 큰 피해를 주고 있는 실정이다. 여기서, ESS의 용도에 따른 화재사고는 표 1과 같이 신재생 에너지 연계용 31건(76%), 피크 저감용 7건(18%), 주파수 제어 2건(5%)이 발생한 것을 알 수 있다. 한편, 설치 위치에 따른 ESS의 화재 사고는 산지 26건(65%), 해안가 4건(10%), 공장지대 7건(7.2), 평지 2건(5%), 기타 1건(2.5%)이 발생한 것을 알 수 있다. 정부는 민관합동 ESS 화재사고 조사를 진행하여, 충전을 제한 등의 대책을 제시했지만, ESS의 화재사고가 지속적으로 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 화재 사고 사례를 바탕으로 각 ESS가 설치되는 용도에 따라 설치 장소, 건물의 형태, 계통으로부터 연계 거리 등을 통계적으로 분석하여, RPN 평가를 수행한다. 따라서, 본 논문에서는 용도에 따른 ESS의 안전성을 평가하기 위하여, 태양광 연계용, 주파수 조정용, 피크 저감용 ESS의 운용환경을 고려한 안전성 평가방안을 제시하고자 한다.

3. 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 사고유형별 안전성 평가방안

시스템의 안전성을 평가하기 위해서는 설비를 구성하고 있는 다양한 요소들에 대한 위험성을 분석해야 하는데, 일반적으로 RPN 방식이 가장 많이 사용되고 있으며, 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하여 산정된다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다. 또한, 각 요소에 대한 위험등급은 그림 1과 같으며, RPN이 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다. 한편, 상기에서 제시한 평가방안은 등급에 대한 분류 기준이 복잡하므로, 본 논문에서는 그림 2와 같이 실제 운용조건을 고려하여 위험등급을 분류한다.

[표 1] ESS의 화재사고 사례

순번	용도	설치 위치	건물 형태	사고일
1	풍력	해안가	컨테이너	17.08.02
2	주파수 제어	산지	컨테이너	18.05.02
3	풍력	산지	조립식 패널	18.06.02
4	태양광	해안가	조립식 패널	18.06.15
5	태양광	해안가	조립식 패널	18.07.12
6	풍력	산지	조립식 패널	18.07.21
7	피크 저감	공장지대	조립식 패널	18.07.28
8	태양광	산지	조립식 패널	18.09.01
9	태양광	해안가	조립식 패널	18.09.07
10	태양광	상업지역	콘크리트	18.09.14
11	주파수 제어	공장지대	컨테이너	18.10.18
12	태양광	산지	조립식 패널	18.11.12
13	태양광	산지	조립식 패널	18.11.12
14	태양광	산지	조립식 패널	18.11.21
15	태양광	산지	조립식 패널	18.11.21
16	피크 저감	산지	조립식 패널	18.12.17
17	태양광	산지	콘크리트	18.12.22
18	피크 저감	공장지대	콘크리트	19.01.14
19	태양광	산지	조립식 패널	19.01.14
20	태양광	산지	컨테이너	19.01.15
21	피크 저감	공장지대	콘크리트	19.01.21
22	태양광	산지	조립식 패널	19.05.04
23	태양광	산지	조립식 패널	19.05.26
24	태양광	산지	조립식 패널	19.08.30
25	풍력	산지	조립식 패널	19.09.24
26	태양광	산지	조립식 패널	19.09.29
27	태양광	산지	조립식 패널	19.10.21
28	태양광	평지	조립식 패널	19.10.27
29	태양광	평지	조립식 패널	20.05.27
30	피크 저감	공장지대	콘크리트	20.09.03
31	태양광	산지	조립식 패널	21.03.11
32	태양광	산지	조립식 패널	21.04.06
33	피크 저감	공장지대	콘크리트	22.01.12
34	태양광	산지	조립식 패널	22.01.17
35	태양광	산지	조립식 패널	22.05.01
36	태양광	산지	조립식 패널	22.05.02
37	피크 저감	공장지대	철골	22.09.06
38	태양광	산지	컨테이너	22.09.06
39	태양광	산지	조립식 패널	22.12.08
40	태양광	산지	조립식 패널	22.12.27

RPN(S*O*D)	RPN rating									
severity(S)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(nearly impossible)			(failure almost inevitable)						
occurrence(O)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(no effect)			(hazardous effect)						
detection(D)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	(almost certain)			(absolute uncertainty)						

[그림 1] RPN 차트

RPN(S*O*D)	RPN rating			
severity(S)	low	medium	high	very high
occurrence(O)	low	medium	high	
detection(D)	low	medium	high	

[그림 2] 제안된 RPN 차트

여기서, 심각도는 사고사례를 반영한 사고유형별 영향도와 사고전류 크기, ESS의 설치타입과 안전장치 설치 유무를 종합적으로 고려하여 평가한다. 먼저, 사고유형별 영향도와 사고전류 크기에 대한 심각도는 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로 표 2와 같이 평가한다[3]. 한편, ESS의 설치 형태가 조립식 패널 타입인 경우, 패널 재질을 통해 연소 확대가 발생해 피해의 규모가 클 가능성이 있으므로 “high”, 콘테이너 타입의 경우 조립식 패널 타입보다 상대적으로 화재에 강하므로 “medium”, 콘크리트 구조는 난연성 재료의 사용으로 화재 발생 시 연소의 가능성이 낮아 “low”로 평가한다. 마지막으로, ESS의 안전장치는 소방설비, 오프가스 검출장치, SPD와 IMD 등 보호기기로 분류할 수 있으며,

설치 유무 개수에 비례하여 심각도를 평가한다. 예를 들어, 소방설비와 보호기기는 의무 설치 규정의 시행되고 있으므로 심각도를 “medium”으로 평가한다.

[표 2] 사고유형별 영향도 및 사고전류 크기의 심각도 평가 조건

내용	심각도			
	very high	high	medium	low
사고전류 크기	20[kA] 이상	20[kA] 미만, 10[kA]이상	10[kA] 미만, 정격전류 이상	정격전류 미만
사고 위치	DC 전로 단락	PCS 압 단락	배터리 랙 단락, AC측 지락	-

한편, 사고의 발생도는 ESS의 용도별 사고 건수와 설치 위치를 종합적으로 고려해 표 3과 같이 평가한다. 먼저, ESS의 화재사고는 2.2절을 바탕으로 23년 1월까지 총 40건의 사고가 발생한 것을 알 수 있고, 신재생 연계용은 31건, 주파수 제어 용은 2건, 피크 저감용은 7건으로 나타난다. 따라서, 용도별 사고 건수에 비례하여 발생도를 평가하며, 주파수 조정용 ESS는 “low”, 피크 저감용 ESS는 “medium”, 가장 화재사고가 많이 발생한 신재생 에너지 연계용 ESS는 “high”로 평가한다. 한편, ESS의 설치 위치는 산지, 해안가, 공장지대, 평지로 분류할 수 있다. 먼저, 산지와 해안가의 경우, 일교차가 크고 결로 발생이 높고 먼지가 많아 배터리에 악영향을 미칠 수 있으므로 “high”, 공장지대는 주변 부하에 의해 배터리가 영향을 받을 수 있으므로 “medium”, 평지는 비교적 일교차가 작고 결로 및 먼지 발생이 적어 “low”로 평가한다. 여기서, 종합적인 발생도는 ESS의 사고 건수와 설치 위치의 평균치로 평가한다.

[표 3] 발생도 평가 조건

내용	발생도		
	high	medium	low
ESS 사고 건수	신재생 에너지 연계	주파수 제어	피크 저감
설치위치	산지, 해안가	공장	평지

또한, 사고의 검출도는 ESS의 설치위치에 따른 접근성과 배터리의 용량에 따라 표 4와 같이 평가한다. 여기서, 산지와 해안가에 설치된 ESS의 검출도는 안전관리자로부터 거리가 멀어 사고 발생 시 즉각적인 대응이 어렵고 접근성이 낮으므로 “high”로 평가하며, 평지의 경우는 산지, 해안가에 비해 접근성은 좋지만, 관리자와 ESS 간의 거리가 멀어 사고 발생 즉시 대응이 어려우므로 “medium”, 공장지대는 비교적 안전관리자로부터 거리가 가까워 사고 발생 시 즉각적인 대응이 가능하므로 “low”로 평가한다. 한편, ESS의 용량이 증가할수록 설치되는 배터리의 개수가 증가해 사고 또는 화재가 발생한 지점을 검출하는 것이 어려우므로, 배터리의 용량에 비례하게 검출도를 평가한다. 따라서, RPN에 의한 용도 및 운용환경을 고려한 ESS의 안전성은 상기의 평가방안을 기준으로

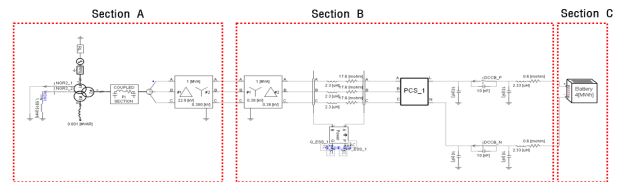
심각도, 발생도, 검출도의 위험등급을 결정하고, “low”, “medium”, “high”, “very high”의 값을 1~4로 한다.

[표 4] 검출도 평가 조건

내용	검출도		
	high	medium	low
접근성	산지, 해안가	평지	공장
ESS의 용량	신재생 에너지 연계	피크 저감	주파수 제어

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 사고평가 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 사고평가 전체 시스템을 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, Section A는 배전계통부로 주변압기, 고압 배전선로 등으로 구성되고, Section B는 연계용 변압기와 PCS를 나타내며, Section C는 배터리부로 배터리 랙으로 구성되어 있다.



[그림 3] 전체시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

ESS의 용도별 및 운용환경을 고려한 안전성을 평가하기 위하여, 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 5와 같다. 여기서, ESS의 용량은 신재생 에너지 연계용, 피크 저감용, 주파수 제어용을 기준으로 4[MWh], 2[MWh], 0.25[MWh]로 상정한다. 한편, ESS의 사고 시나리오는 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로, DC전로 단락, 배터리 랙 단락, PCS 압 단락, AC 지락으로 상정한다.

[표 5] 시뮬레이션 조건

항목		내역
변압기	정격 용량[kVA]	1,000
	전압[kV]	22.9/0.38
	결선 방식	△-Yg
PCS	정격 용량[kW]	1,000
	필터 리액터[uH]	400
	필터 커패시터[uF]	250
DC 전로	저항[mΩ]	0.6
	인덕턴스[uH]	2.33
배터리	정격 용량[MWh]	0.25 / 2 / 4
	단락 저항[mΩ]	10

5.2 ESS의 사고전류 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 용도별 ESS의 시나리오별 사고특성을 나타내면 표 6과 같다. 먼저, 신재생 에너지 연계용과 피크 저감용 ESS의 경우, AC 지락을 제외한 모든 사고 시나리오에서 20[kA] 이상의 전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히, 신재생 에너지 연계용 ESS에서 DC 전로 단락 사고가 발생하는 경우, 70.37[kA]의 사고전류가 발생해 배터리에 악영향을 가능성이 높음을 알 수 있다. 한편, 주파수 조정용 ESS의 경우, 모든 사고 시나리오에서 20[kA]이하의 사고전류가 발생하며, 배터리 랙 단락의 경우 10[kA] 이하의 사고전류가 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 ESS의 용량이 클수록 사고전류의 크기가 증가해 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.

[표 6] 용도별 ESS의 사고특성

ESS 용도	사고 위치	사고전류 크기[kA]
신재생 에너지 연계	배터리 랙 단락	42.59
	DC 단락	70.37
	PCS 압 단락	56.27
	AC측 지락	0
피크 저감	배터리 랙 단락	38.63
	DC 단락	58.59
	PCS 압 단락	48.30
	AC측 지락	0
주파수 제어	배터리 랙 단락	7.91
	DC 단락	17.66
	PCS 압 단락	14.26
	AC측 지락	0

5.3 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 사고유형별 안전성 평가

따라서, 상기에서 제시한 안전성 평가 방안을 바탕으로, 운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 안전성을 평가하면 표 7과 같다. 먼저, 신재생 에너지 연계용 ESS의 RPN 값은 18 ~ 36 점으로 평가되며, 4가지 사고 유형에 대한 합은 108점으로 산정된다. 또한, 피크 저감용 ESS의 RPN 값은 4 ~ 6점으로 평가되며, 4가지 사고 유형에 대한 합은 22점으로 산정된다. 한편, 주파수 제어용 ESS의 RPN 값은 4 ~ 6점으로 평가되며, 4가지 사고 유형에 대한 합은 20점으로 산정된다. 즉, ESS의 용도를 고려하는 경우, 태양광 연계용 ESS의 위험 순위가 가장 높게 평가되며, 배터리의 용량이 클수록 사고의 위험성이 높아지는 것을 알 수 있다. 또한, 먼저 및 결로, 온도 및 습도 등의 운용환경이 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높음을 알 수 있다. 따라서, ESS 운용 시, 설치 위치와 형태, 보호기기의 유무 등, 주변 환경과 안전 장치 등에 대한 면밀한 검토가 필요함을 알 수 있다.

[표 7] ESS의 운용환경 및 용도를 고려한 사고유형별 안전성 평가

ESS 용도	사고 위치	심각도	발생도	검출도	RPN	합
신재생 에너지 연계	배터리 랙 단락	high	high	high	27	108
	DC 단락	very high	high	high	36	
	PCS 압 단락	high	high	high	27	
	AC측 지락	medium	high	high	18	
피크 저감	배터리 랙 단락	high	medium	low	6	22
	DC 단락	high	medium	low	6	
	PCS 압 단락	high	medium	low	6	
	AC측 지락	medium	medium	low	4	
주파수 제어	배터리 랙 단락	medium	low	medium	4	20
	DC 단락	high	low	medium	6	
	PCS 압 단락	high	low	medium	6	
	AC 지락	medium	low	medium	4	

6. 결 론

본 논문에서는 ESS의 운용환경 및 용도를 고려한 안전성 평가방안을 제시하며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 사고평가 모델링을 수행한다. 따라서, 상기에서 제시한 안전성 평가 및 시뮬레이션을 수행한 결과, ESS의 용도를 고려하는 경우, 태양광 연계용 ESS의 위험 순위가 가장 높게 평가되어, ESS의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, ESS의 사고 위치를 고려하는 경우, DC 단락 사고가 가장 높은 위험 순위로 평가되며, ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, ESS 운용 시, 설치 위치와 형태, 보호기기의 유무 등, 주변 환경에 대한 면밀한 검토가 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김운호, 김지명, 김경화, 이예빈, 노대석, “ESS의 사고유형별 안전성 평가에 관한 연구”, 대한전기학회, 8, 887-896, 2023
- [2] 이일용, “FR ESS의 화재 예방, 설비 개선 및 보호 기술 현장 적용”, KEPCO Journal on Electric Power and Energy, 6월, 2021
- [3] 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회, ‘ESS 화재사고 원인조사 결과’, 2019