

# ESS의 구성 및 사고유형별 안전성 평가방안에 관한 연구

김윤호, 이나경, 이진호, 광충근, 노대석  
한국기술교육대학교  
e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

## A Study on Safety Evaluation Method in ESS Considering System Configuration and Fault Cases

Yun-Ho Kim, Na-Kyung Lee, Jin-Ho Lee, Chung-Guen Kwak, Dae-Seok Rho  
Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 신재생에너지의 간헐성 보완 및 전력수요를 관리할 수 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 수요가 급격하게 증가하고 있으나 국내에서 지속적으로 화재사고가 발생하여 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 화재사고에 대한 원인을 제시하고 있는데 다양한 사고유형에 의한 사고전류도 중요한 전기적 위해요인으로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 구성과 사고유형을 분석하여 DC 전로 단락, 배터리 랙 단락, PCS Arm 단락, AC측 지락을 주요 사고유형으로 상정하고, 위험순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여 사고유형별 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 사고발생 장치부 등으로 구성된 ESS의 모델링을 수행하고 사고유형별 상정 시나리오에 따른 사고특성을 제시한다. 이를 바탕으로 사고유형별 ESS의 안전성을 평가한 결과, AC측 지락과 PCS Arm 단락, 배터리 랙 단락, DC 전로 단락의 RPN이 각각 24점, 24점, 27점, 48점으로 산정되어, DC 전로 단락이 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위해서 신재생에너지원의 도입이 증가함에 따라, 신재생에너지의 간헐성 보완 및 전력소비를 효율화 할 수 있는 전기저장장치의 수요가 급격하게 증가하고 있다. 그러나, 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재사고가 지속적으로 발생하여 국내 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 안전성 확보를 위하여, 사고원인에 대한 조사를 시행하여, 화재사고에 대한 원인을 제시하고 있는데 그 중, ESS 구성품 및 시스템에서 발생하는 다양한 사고지점에 따른 사고전류도 주요한 전기적인 위해요인 중 하나로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 구성과 사고사례를 분석하여 주요 사고유형을 선정하며, 이를 바탕으로 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험순위 결정방법을 통해 ESS의 사고유형별 안전성 등급 평가방안을 제시한다. 또한, 사고에 의한 안전성 평가를 수행하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 사고발생 장치부로 구성된 ESS의 모델링을 수행한다. 이를

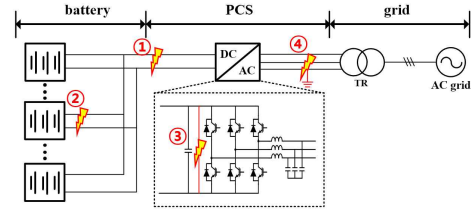
바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과 DC 전로 단락, PCS Arm 단락, 단일 배터리 랙 단락의 순서대로 사고전류가 높게 나타남을 알 수 있으며, AC측 지락 시, 배터리 랙과 계통측에서 사고전류가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 한편, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 사고유형의 심각도, 발생도, 검출도를 산정하고 사고유형별 안전성 등급을 평가한 결과, AC측 지락과 PCS Arm 단락, 배터리 랙 단락, DC 전로 단락이 각각 24점, 24점, 27점, 48점으로 평가되어 DC 전로 단락이 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 2. ESS의 구성 및 사고유형 분석

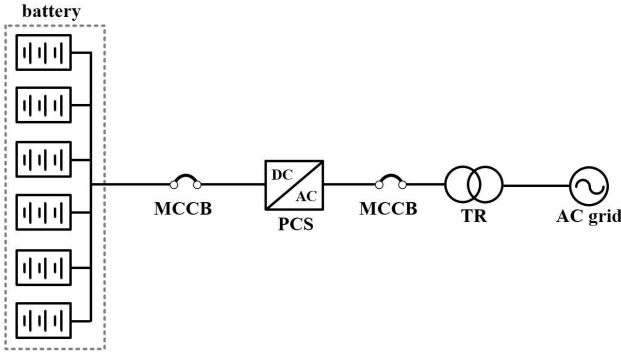
### 2.1 ESS의 구성

ESS는 주파수 조정, 수요관리, 신재생에너지 연계 등의 운용목적에 따라 충·방전 시간(kWh)과 출력용량(kW)이 결정되고, 이를 바탕으로 PCS의 용량과 배터리의 용량이 산정된다. 한편, PCS의 용량은 단일로 연결하거나 여러 대를 병렬로 연결하여 구성되어진다. 여기서, 그림 1은 PCS의 용량에 따

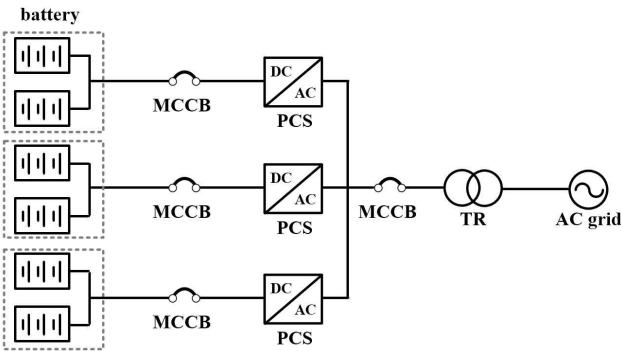
큰 ESS의 구성을 나타내며, 그림 1의 (a)와 같이, PCS를 단일로 구성하는 경우 하나의 PCS에 모든 배터리가 연계되기에 따라 배터리의 합성 임피던스가 감소하여 사고에 대한 위험성이 증가할 가능성이 있다. 또한, 그림 1의 (b)와 같이, 다수의 PCS를 병렬 구성하는 경우 각 PCS에 배터리가 분산되어 상대적으로 사고에 대한 위험성이 감소할 수 있다.



[그림 2] ESS의 사고유형



(a) 단일 PCS로 구성된 ESS



(b) 다수의 PCS로 병렬 구성된 ESS

[그림 1] ESS의 구성

2.2 ESS의 사고유형 분석

민관합동으로 제시한 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”에 의하면, DC측에 단락이 발생할 경우 약 20kA의 사고 전류가 발생하여 배터리의 열폭주에 의하여 화재가 발생함을 알 수 있다[1]. 또한, 배터리 랙에서 단락이 발생하는 경우 배터리 결선 케이블에 소손 및 화재가 발생함을 알 수 있으며, PCS 내부의 스위칭 소자의 소손(Arm 단락)으로 사고가 발생하는 경우, 계통과 배터리 측으로부터 대전류가 유입될 가능성이 있다. 상기의 내용을 바탕으로 그림 2와 같이, 사고발생 가능성이 높은 ①, ②의 DC측 단락과 ③의 PCS Arm 단락, ④의 AC측 지락을 주요 사고유형으로 선정할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기에서 제시한 사고유형과 PCS의 용량 및 배터리의 용량 등의 ESS의 구성조건에 따라 사고의 위험성을 파악하고, 이를 토대로 사고유형별 안전성 등급의 평가 방안을 제시하고자 한다.

3. ESS의 사고유형별 안전성 등급 평가방안

일반적으로, 시스템의 안전성을 평가하기 위하여 RPN 방식이 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 RPN 방식은 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하여 산정되며 각 요소에 대한 위험등급은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 위험등급이 낮을수록 위험에서 안전하고, 높을수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다. 하지만, 기존의 RPN은 위험등급에 대한 분류가 많아서 안전성을 평가하는데 복잡하므로, 본 연구에서는 그림 4와 같이 위험등급을 “low”, “medium”, “high”, “very high”로 구분된다.

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 3] 기존의 RPN

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

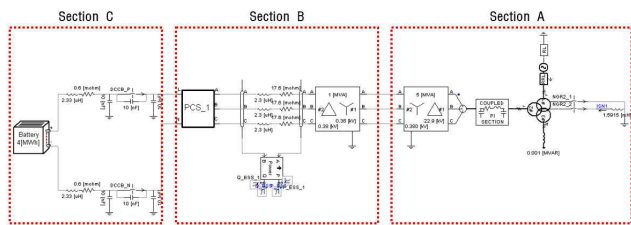
[그림 4] 제안된 RPN

상기에서 제안된 RPN 모델링에서 사고의 심각성(S)은 사고사례를 반영한 사고유형별 영향도와 사고전류 크기를 종합적으로 고려하여 평가한다. 여기서, 사고유형별 영향도는 2.2 절을 바탕으로 “low”, “medium”, “high”, “very high”로 분류하는데, 먼저 DC 전로 단락은 배터리의 열폭주에 의하여 화재가 발생한 사례를 통해 “very high”로 평가하고, PCS Arm 단락은 사고전류가 유입되어 PCS의 스위칭 소자의 소손이 발생한 사례를 바탕으로 “high”으로 평가한다. 또한, 배터리 랙 단락은 배터리 결선 케이블에 소손이 발생한 사례를 바탕으로 “medium”으로 분류하며 AC측 지락은 사고발생 시 MC에 소손이 발생한 사례를 통해 “medium”으로 평가한다. 한

편, “원인조사 결과보고서”을 바탕으로 20[kA] 이상이면 “very high”로 평가하고, 20[kA]보다 작고 10[kA] 이상이면 “high”로, 10[kA]보다 작고 정격전류 이상이면 “medium”으로 정격전류 이하이면 “low”로 평가한다. 여기서, 사고의 심각도(S)는 사고유형별 영향도와 사고전류 크기가 모두 “very high” 이상이면 “very high”로 분류하며, 나머지도 동일한 방법으로 평가한다. 한편, 사고의 발생도(O)는 사고의 발생빈도를 바탕으로 평가되지만, 발생빈도에 대한 공인된 자료가 없는 실정하기에, 사고지점의 노출 환경에 따라 평가한다. 여기서, AC측 지락은 외부에 노출되어 사고 발생도가 높아 “high”로 평가하고 PCS Arm 단락은 외부에 노출되어 있지 않지만 PCS의 제어방식에 따라 사고가 발생할 가능성이 있으므로 “medium”으로 평가하며, DC 전로 단락과 배터리 랙 단락의 사고유형은 외부에 노출되어 있지 않기 때문에 발생도를 “low”로 상정한다. 또한, 사고의 검출도(D)는 사고지점과 배터리간 보호기능 정도에 따라 평가한다. 여기서, 배터리 랙 단락과 DC 전로 단락의 사고유형은 사고지점과 배터리간 보호기능이 상대적으로 부족하여 “high”로 상정하며, AC측 지락의 사고유형은 IMD(insulation monitoring device)가 기생 커패시턴스에 의한 오동작 발생 가능성이 있으므로 검출도를 “medium”으로 평가하고 PCS Arm 단락의 사고유형은 보호계전기와 인버터의 보호기능을 통하여 사고발생 유무를 명확하게 예측할 수 있으므로 검출도를 “low”로 분류한다.

#### 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, Section A는 주변압기, 고압 배전선로, 배전용 변압기로 구성된 배전계통부를 나타내고, Section B는 연계용 변압기와 PCS를 나타내며, Section C는 배터리 랙으로 구성된 배터리부를 나타낸다.



[그림 5] 전체 시스템 모델링

### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 5.1 시뮬레이션 조건

ESS의 사고유형별 안전성 등급을 평가하기 위하여, 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, PCS의 용량은 500[kW] PCS 2대와 1,000[kW] PCS 1대인 경우로 구성하고, 배터리의 용량은 2시간 또는 4시간 용량으로 상정한다. 먼저, 1,000[kW]의 PCS의 경우, L-C 필터를 800[uH], 500[uF]으로 상정하고, DC 전로의 저항 및 인덕턴스를 각각 0.6[mΩ], 2.33[uH]으로 상정한다. 또한, 500[kW] PCS 2대를 병렬 연결하는 경우, L-C 필터를 400[uH], 250[uF]으로 상정하고, DC 전로의 저항 및 인덕턴스를 각각 1.2[mΩ], 4.66[uH]으로 상정한다. 한편, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 각 시나리오를 나타내면 표 2와 같다. 여기서, Case 1과 Case 2는 2대의 500[kW] PCS와 2시간, 4시간의 배터리 용량인 경우이며, Case 3과 Case 4는 1,000[kW] PCS가 단일로 구성되고 배터리 용량이 각각 2시간, 4시간인 경우를 나타낸다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목	내역	
	단위용량[kW]	내역
PCS	단위용량[kW]	500, 1,000
	연결수[EA]	2, 1
	필터 리액터 [uH]	800, 400
	필터 커패시터 [uF]	500, 250
DC 전로	전로 저항[mΩ]	1.2, 0.6
	전로 인덕턴스[uH]	4.66, 2.33
Battery	단위용량 [kWh]	1,000, 2,000, 2,000, 4,000

[표 2] 사고유형에 대한 상정 시나리오

	PCS 용량 [kW]	배터리 용량 [kWh]	병렬 연결수 [EA]
Case 1	500	1,000	2
Case 2	500	2,000	2
Case 3	1,000	2,000	1
Case 4	1,000	4,000	1

#### 5.2 ESS의 사고유형별 사고특성

사고유형에 대한 Case별 사고특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, DC 전로 단락의 경우, 사고전류가 모든 시나리오에서 20[kA] 이상이 발생하며, 배터리 랙 단락의 경우, PCS가 1,000[kW] 단일 구성이고 배터리의 용량이 4,000[kWh]으로 집중된 시나리오에만 사고전류가 20[kA] 이상 발생함을 알 수 있다. 또한, PCS Arm 단락의 경우, PCS가 500[kW] 병렬 구성이고 각 PCS에 연계되는 배터리 용량이 1,000[kWh]로 분산된 시나리오를 제외한 나머지 시나리오에서 사고전류가 20[kA] 이상 발생하는 것을 알 수 있으며, AC측 지락의 경우, 연계용 변압기가 Yg-Δ 결선방식으로 구성되어 사고전류의 경로가 형성되지 않아 모든 조건에서 사고전류가 거의 발생

하지 않음을 알 수 있다. 이를 통해, PCS에 연계되는 배터리의 용량이 집중 될수록 사고에 대한 위험성이 증가함을 알 수 있으며, 모든 시나리오에서 DC 전로 단락, PCS Arm 단락, 배터리 랙 단락, AC측 지락 순으로 사고전류가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

[표 3] 사고유형에 대한 상정 시나리오별 사고특성

사고유형	Case	사고전류[kA]
DC 전로 단락	1	22.2
	2	25.2
	3	25.5
	4	27.5
배터리랙 단락	1	18
	2	19.3
	3	19.3
	4	22
PCS Arm 단락	1	19.6
	2	22.7
	3	23.5
	4	25.1
AC측 지락	1	0.014
	2	0.014
	3	0.014
	4	0.014

### 5.3 ESS의 사고유형별 안전성 등급 평가

상기의 내용을 바탕으로 사고유형에 대한 상정 시나리오별 ESS의 안전성을 평가하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 심각도는 사고유형별 영향도와 사고전류 영향도를 고려하여 “low(1)” ~ “very high”(4)의 가중치를 가지며, 발생도는 노출 환경을 바탕으로 “low(1)” ~ “high(3)”, 검출도는 사고지점과 배터리간 보호기능에 따라 “low(1)” ~ “high(3)”으로 산정한다. 먼저, DC 전로 단락의 경우, 사고유형 영향도가 매우 높고 사고전류의 크기가 가장 높아 심각도가 모두 “very high(4)”로 평가되며, 외부에 거의 노출되지 않아 발생도를 “low(1)”, 사고지점과 배터리간 보호기능이 부족하여 검출도를 “high(3)”으로 산정한다. 배터리 랙 단락의 경우, 사고유형 영향도와 사고전류의 크기가 상대적으로 작아 심각도가 “medium(2)” 3개 “high(3)” 1개로 평가되며, 외부에 거의 노출되지 않아 발생도를 “low(1)”, 사고지점과 배터리간 보호기능이 부족하여 검출도를 “high(3)”으로 산정한다. 또한, PCS Arm 단락의 경우, 사고유형 영향도가 높고 사고전류의 크기가 상대적으로 높아 심각도가 모두 “high(3)”로 평가되며, 제어방식에 따라 사고가 발생할 가능성이 있어 발생도를 “medium(2)”으로 평가하고, 보호계전기와 인버터의 보호기능을 통하여 검출도를 “low(1)”으로 산정한다. 한편, AC측 지락의 경우, 사고전류가 거의 발생하지 않아 심각도가 모두 “low(1)”로 평가되며, AC 배전선로가 외부에 노출되어 있어 발생도를 “high(3)”으로 산정하고 IMD의 오동작 가능성을 바

탕으로 검출도를 “medium(2)”으로 평가한다. 즉, AC측 지락과 PCS Arm 단락, 배터리 랙 단락, DC 전로 단락의 RPN이 각각 24점, 24점, 27점, 48점으로 평가되며 DC 전로 단락이 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 4] ESS의 사고유형별 안전성 등급평가

사고유형	Case	심각도	발생도	검출도	RPN
DC 전로 단락	1	4	1	3	48
	2	4	1	3	
	3	4	1	3	
	4	4	1	3	
배터리랙 단락	1	2	1	3	27
	2	2	1	3	
	3	2	1	3	
	4	3	1	3	
PCS Arm 단락	1	3	2	1	24
	2	3	2	1	
	3	3	2	1	
	4	3	2	1	
AC측 지락	1	1	3	2	24
	2	1	3	2	
	3	1	3	2	
	4	1	3	2	

## 6. 결 론

본 연구에서는 ESS 화재 원인의 주요 요인중 하나로 거론되고 있는 사고유형에 대해 분석하고 ESS의 사고유형별 안전성 평가방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS의 모델링을 수행한다. 사고유형에 대한 상정 시나리오별 ESS의 안전성 등급 평가를 수행한 결과, AC측 지락과 PCS Arm 단락, 배터리 랙 단락, DC 전로 단락이 24점, 24점, 27점, 48점으로 평가되어 DC 전로 단락이 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받아 수행한 연구(No.CPS22131-120)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 이일용, “FR ESS의 화재 예방, 설비 개선 및 보호 기술 현장 적용”, KEPCO Journal on Electric Power and Energy, 6월, 2021년.
- [2] 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회, ‘ESS 화재사고 원인조사 결과’, 2019년.