

# 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성 평가 방안에 관한 연구

김지명<sup>\*\*\*</sup>, 황승욱<sup>\*\*</sup>, 정재범<sup>\*</sup>, 이명근<sup>\*</sup>, 노대석<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>한국기술교육대학교

<sup>\*\*</sup>한국화학융합시험연구원

e-mail:kimejd@ktr.or.kr

## A Study on the Safety Evaluation Method of ESS Considering Electrical Hazard Factors

Ji-Myung Kim<sup>\*\*\*</sup>, Seung-Wook Hwang<sup>\*\*</sup>, Jae-Beom Jung<sup>\*</sup>, Myung-geun Lee<sup>\*</sup>,  
Dae-Seok Rho<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Korea University of Technology and Education

<sup>\*\*</sup>Korea Testing & Research Institute

### 요약

최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 전기적 위해요인은 화재사고의 주요 원인으로 ESS의 배터리 안전성에 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 사고전류, CMV, 서지, 철공진, 누설전류, 순환전류로 분류된 전기적 위해요인을 바탕으로 심각도, 발생도, 검출도에 의한 위험 우선순위 평가방안(RPN, risk priority number)을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전계통부, PCS부, 배터리부, 등으로 구성된 ESS의 안전성 평가 모델링을 수행한다. 상기의 안전성 평가방안 및 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인에 대한 ESS의 안전성을 평가한 결과, 23가지의 전기적 위해요인 가운데 DC 전로 단락의 위험순위가 가장 높게 산정되어, ESS의 보호기기를 적절하게 운용해야 함을 알 수 있다.

## 1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여 도입되고 있는 신재생에너지의 간헐성을 보완하고 전력소비를 효율화할 수 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 수요가 급격하게 증가하고 있다[1-3]. 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 그 원인을 제시하고 있는데, 이중 전기적 위해요인은 ESS 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다[4]. 따라서, 본 논문에서는 누설전류, 순환전류, CMV, 서지, 사고전류의 전기적 위해요인에 대한 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험 우선순위 평가방안(RPN, risk priority number)을 바탕으로, ESS의 안전성 평가를 수행한다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다.

한편, 각 요인별 심각도를 평가하기 위하여, 본 논문에서는 실 계통에서 운용되고 있는 ESS 사이트를 대상으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 등으로 구성된 ESS 심각도 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC 전로 단락은 44점의 점수로 제일 위험도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

## 2. 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성 평가 방안

### 2.1 사고전류에 대한 안전성 평가 방안

대상 시스템의 안전성을 평가하기 위해서는 설비를 구성하고 있는 다양한 요소들에 대한 위험성을 분석해야 하는데, 일반적으로 RPN(risk priority number) 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 가능성

을 나타낸다. 또한, 각 요소에 대한 위험등급은 그림 1과 같이 나타낼 수 있는데, 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다.

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 위험 등급

한편, 상기에서 제시한 평가방안은 등급에 대한 분류 기준이 많고 운용함에 있어 다소 복잡하며, 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)가 각각 동일한 가중치를 갖는 한계점이 있으므로 본 논문에서는 그림 2와 같이 실제 상황에 적합한 위험등급으로 분류한다.

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

[그림 2] 제안한 RPN 위험 등급

사고전류에 대한 심각도는 사고사례를 반영한 사고유형별 영향도와 사고전류 크기를 종합적으로 고려하여 평가한다. 여기서, 사고유형별 영향도는 ESS의 사고사례 분석을 바탕으로 “low”, “medium”, “high”, “very high”로 분류하는데, 먼저 DC 전로 단락은 배터리의 열폭주에 의하여 화재가 발생한 사례를 통해 “very high”로 평가하고, PCS 압 단락은 연계계통과 배터리 랙에서 사고전류가 유입되어 PCS의 스위칭 소자의 소손이 발생한 사례를 바탕으로 “high”로 분류한다. 또한, 배터리 랙 단락은 배터리 결선 케이블에 소손이 발생한 사례를 바탕으로 “medium”으로 평가하며, AC측 지락은 사고 발생 시 배터리 랙용 MC에 소손이 발생한 사례를 통해 “medium”으로 분류한다. 한편, 사고전류 크기는 상기의 “원인조사 결과보고서”을 바탕으로 약 20kA의 사고전류에 의하여 배터리의 열폭주로 화재가 발생한 사례를 바탕으로 20[kA] 이상이면 “very high”로 평가하고, 사고전류가 20[kA]보다 작고 10[kA] 이상이면 “high”로, 10[kA]보다 작고 정격전류 이상이면 “medium”으로 정격전류 이하이면 “low”로 평가한다.

한편, 사고의 발생도는 사고유형의 노출 환경에 따라 평가

한다. 여기서, AC측 지락의 사고유형은 외부에 노출되어 사고 발생도가 높아 “high”로 평가하고, PCS 압 단락은 외부에 직접적으로 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 검출도는 잠재적 사고에 대한 발견 가능성을 나타내며, 사고유형에 따른 보호기기의 설치 개수와 보호기능에 따라 평가한다. 여기서, DC 전로 단락과 배터리 랙 단락의 사고유형은 사고지점 주변에 보호기기가 상대적으로 적게 설치되기 때문에 “high”로 평가하며, AC측 지락의 사고유형은 IMD(insulation monitoring device)을 바탕으로 검출할 수 있지만 동작시간이 늦고, 오동작할 가능성이 있으므로 “medium”으로 분류한다. 또한, PCS 압 단락의 사고유형은 사고지점 주변에 보호기기와 인버터의 보호기기가 있으므로 검출도를 “low”로 평가한다. 한편, RPN에 의한 사고유형별 ESS의 안전성은 상기의 평가방안을 기준으로 심각도, 발생도, 검출도의 위험등급을 결정하고, 이를 바탕으로 정량화하여 종합적으로 판단한다.

## 2.2 CMV 및 서지에 대한 안전성 평가 방안

CMV의 심각도(S)는 크기에 따라 4가지 단계로 산정되며, 크기가 증가할수록 높은 위험등급을 적용한다. 즉, 전압의 크기가 배터리의 정격전압 이하인 경우에 위험등급을 “very low”로 평가하고, 전압의 크기가 정격전압 이상이고 절연내력 이하인 경우에는 “low”, 절연내력을 초과하는 경우에는 “high”, 절연내력을 수배 초과하는 경우에는 “very high”로 평가한다. 또한, CMV 및 서지의 발생도(O) 위험등급은 3가지 단계를 적용한다. 여기서, IGBT 스위칭과 정상상태 개폐는 ESS 충·방전에 의하여 일반적으로 발생하므로 위험등급을 “medium”로 평가하며, 차단기 개폐와 뇌격에 의한 CMV는 각각 “low”와 “very low”로 평가한다. 즉, 차단기 개폐를 유발하는 전력계통의 사고율이 뇌의 발생 확률보다 현저하게 높기 때문이다. 한편, 뇌의 발생은 기상청에서 제공하는 연간 낙뢰일수를 기반으로, ESS 설치 지역에 따라 발생도의 위험등급을 적용한다. 마지막으로 검출도(D)는 CMV 및 서지의 잠재적 발견 가능성을 나타내는데, ESS에 의무적으로 설치되어 있는 서지보호장치(SPD, surge protection device)에 의하여 검출된다. 여기서, SPD는 ESS 설치 장소마다 서로 다른 정격전압(Un) 및 정정치(U<sub>p</sub>, U<sub>c</sub>)로 운용되어, CMV의 크기에 따라 SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성이 있다. 즉, 검출도의 위험등급은 CMV 크기에 반비례하여 “low”, “medium”, “high”의 3단계로 평가될 수 있다.

한편, 철공진의 심각도(S)는 크기에 따라 4가지 단계로 산정되며, 크기가 증가할수록 높은 위험등급을 적용한다. 즉, 전압의 크기가 배터리의 정격전압 이하인 경우에 위험등급을 “very low”로 평가하고, 전압의 크기가 정격전압 이상이고 절연내력 이하인 경우에는 “low”, 절연내력을 초과하는 경우에는 “high”, 절연내력을 수배 초과하는 경우에는 “very high”로 평가한다. 또한, 철공진의 발생도(O) 위험등급은 4가지 단계를 적용한다. 여기서, 부하불평형율이 50% 이하이거나 접지를 측정하기 어려운 경우에는 “medium”으로, 부하불평형율이 50% 초과거나 대규모의 태양광전원이 있는 경우에는 “high”로 평가한다. 마지막으로 검출도(D)는 철공진의 잠재적 발견 가능성을 나타내는데, ESS에 의무적으로 설치되어 있는 서지보호장치(SPD, surge protection device)에 의하여 검출된다. 여기서, SPD는 ESS 설치 장소마다 서로 다른 정격전압(Un) 및 정정치(U<sub>p</sub>, U<sub>c</sub>)로 운용되어, CMV의 크기에 따라 SPD가 철공진을 검출하지 못할 가능성이 있다. 즉, 검출도의 위험등급은 철공진 전압의 크기에 반비례하여 “low”, “medium”, “high”의 3단계로 평가될 수 있다.

### 2.3 누설 및 순환전류에 대한 안전성 평가 방안

먼저, 누설전류 및 순환전류의 심각도는 배터리측으로 유입되는 누설 및 순환전류의 크기에 따라 평가한다. 여기서, 심각도는 표 1과 같이 IEC 60479 및 한국전기설비규정을 바탕으로 누설 및 순환전류의 크기에 따라 높은 가중치를 적용하여 위험등급을 “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high”의 5가지로 분류한다. 즉, 누설전류의 크기가 한국전기설비규정값(1[mA]) 이하이면 “very low”로 평가하고, 1[mA]보다 크고 이탈한계 전류(9[mA])보다 작으면 “low”로, 9[mA]보다 크고 심실세동 전류(60[mA])보다 작으면 “medium”으로, 60[mA]보다 크고 전기설비기술기준(500[mA])보다 작으면 “high”로, 500[mA]보다 크면 “very high”로 평가한다.

[표 1] 누설 및 순환전류 심각도 평가 방안

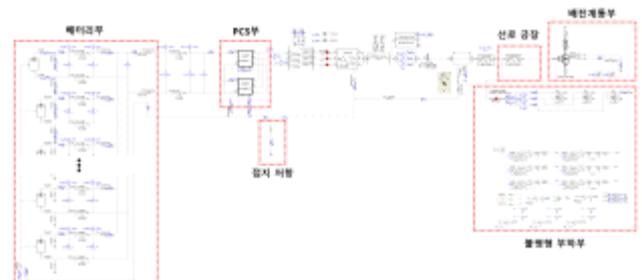
항목	내역
1[mA] 미만	very low
1[mA] 이상 9[mA] 미만	low
9[mA] 이상 60[mA] 미만	medium
60[mA] 이상 500[mA] 미만	high
500[mA] 이상	very high

또한, 누설 및 순환전류의 발생도는 누설 및 순환전류의 발생빈도를 바탕으로 평가하며, IGBT 스위칭 및 배터리 기생 커패시턴스에 대한 발생도는 ESS의 충·방전시에만 발생하므로 “medium”, 절연성능 저하에 대한 발생도는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 “low”, 불평형부하에 대한 발생도는 상시 존재하므로 “high”로 분류한다. 한편, 검출도(D)는 배터리로 유

입되는 누설 및 순환전류의 측정 가능성을 바탕으로 평가되지만, 대부분 IMD에 의하여 검출되므로 IGBT의 기생커패시턴스, 배터리의 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 불평형부하에 대한 검출도를 일정 값으로 분류한다.

## 3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의 안전성 평가 모델링

배전계통부, PCS부, 배터리부, 등으로 구성된 전체 시스템은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리의 용량과 방열판 설계에 따라 변동되는 기생 커패시턴스의 값은 실증 사이트의 데이터를 바탕으로 배터리 및 PCS부 기생 커패시턴스의 모델링에 적용한다.



[그림 3] 전체 시스템 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

전기적 위해요인에 대한 ESS의 안전성 등급을 평가하기 위하여, PCS, 배터리 등의 시뮬레이션 조건은 Table. 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리부는 0.7[kV], 1[kAh]의 배터리 랙을 15개 병렬로 연결하여 1.05[MWh]의 용량을 가지며, 각 배터리 랙의 내부 인덕턴스 및 내부 저항은 제조사의 값을 바탕으로 각각 6[uH], 152.6[mΩ]으로 상정한다. 또한, 배터리 및 DC 전로의 기생 커패시턴스는 10[nF], 15[nF], 20[nF], IGBT의 기생 커패시턴스는 0.5[nF], 1[nF], 1.5[nF], 절연 성능은 1[MΩ], 20[MΩ]으로 상정한다. 한편, 선로 공장은 5[km], 10[km], 15[km]이며, 불평형 부하의 용량은 10[MVA], 불평형율은 5[%], 15[%], 30[%], 접지 저항은 1[Ω], 30[Ω], 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 8[Ω], 3.52[Ω]으로 상정한다. 한편, 연계용변압기의 결선방식은 Yg-Yg, Yg-Δ, Δ-Yg, Δ-Δ를 고려한다.

[표 2] 시뮬레이션 조건

	항목	내역	
배터리랙	전압[kV]	0.7	
	용량[kAh]	1	
	내부 인덕턴스[uH]	6	
	내부 리액턴스[mΩ]	152.6	
기생 커패시턴스	battery & DC line[nF]	10, 20	
	IGBT[nF]	1, 2	
선로절연저항	insulation resistance[MΩ]	1, 20	
배전계통부	선로 공장[km]	5, 15	
	부하[MVA]	10	
	불평형률[%]	5, 15	
ESS부	접지저항[Ω]	1, 30	
	변압기 결선방식	Yg-Yg	
		Yg-Δ	
		Δ-Yg	
		Δ-Δ	
배터리 외함[Ω]	8		
PCS 외함[Ω]	3.52		

#### 4.2 전기적 위해요인에 대한 ESS의 안전성 평가

상기에서 제안한 안전성 평가 방안에 따라 사고, 순환전류, CMV, 서지, 누설전류의 전기적 위해요인에 대한 RPN 평가 점수를 나타내면 표 2와 같다. 여기서, DC 전로 단락은 44점의 점수로 제일 위험도가 높게 나타났으며, 사고전류의 위험도 순위는 1, 4, 7, 11등으로 평가됨을 알 수 있다. 또한, 순환전류는 각각 2, 5, 6, 9등으로 평가되어 상대적으로 높은 순위에 분포함을 확인할 수 있다. 한편, CMV는 3, 8, 12, 13등으로 평가되며, 변압기의 결선방식에 따라 위험도를 많이 낮출 수 있음을 알 수 있으며, 서지는 10, 14, 16등이며 발생빈도가 적어 낮은 순위로 평가되지만 위험도가 높음으로 SPD등 보호기기를 적절히 설치해야 함을 알 수 있다.

또한, 순환전류는 2, 5, 6, 9등으로 높은 순위로 평가되며, 계통 조건에 따라 항상 발생할 수 있으므로 계통 조건에 대한 면밀한 검토가 요구되며, 누설전류는 17, 18, 19등으로 각각 10점 미만의 낮은 점수로 평가되어 상대적으로 위험성이 적음을 알 수 있으나 상시 발생가능하며 작업자의 안전에 영향을 끼칠 가능성이 있으므로 작업시 주의가 필요함을 알 수 있다. 그리고 철공진은 4등, 9등, 12등, 14등으로 평가되며, 비교적 높은 등급으로 평가된 점과 철공진 현상으로 인해 설비가 손상될 경우의 손해를 고려하여 추가적인 커패시턴스, SPD 설치 등 보호방안이 요구됨을 알 수 있다.

[표 3] 전기적 위해요인별 RPN

no	항목	내역	RPN
1	사고전류	DC 전로 단락	44
2	순환전류	공장 15km, 불평형률 15%	36
3	CMV	IGBT 스위칭, Δ-Yg	36
4	철공진	DC 접지 전위 상승률 5%	33
5	사고전류	배터리랙 단락	31.9
6	순환전류	공장 5km, 불평형률 15%	28.8
7	순환전류	공장 15km, 불평형률 5%	28.8

8	사고전류	PCS 암 단락	26.4
9	철공진	공장 10km, 불평형률 15%	24.3
10	CMV	IGBT 스위칭, Yg-Yg	24
11	순환전류	공장 5km, 불평형률 5%	21.6
12	철공진	DC 접지전위 상승률 1%	17.2
13	서지	사고시 차단기에 의한 3상 단락	16
14	철공진	공장 10km, 불평형률 10%	14.4
15	사고전류	AC측 지락	13.2
16	CMV	IGBT 스위칭, Yg-Δ	12
17	CMV	IGBT 스위칭, Δ-Δ	12
18	서지	사고시 차단기에 의한 지락	12
19	CMV	정상상태시 개폐	12
20	서지	뇌격	10
21	누설전류	IGBT 기생 커패시턴스	9.45
22	누설전류	배터리 기생커패시턴스	6.75
23	누설전류	선로 절연성능저하	1.8

## 5. 결 론

본 논문에서는 전기적 위해요인에 대한 ESS의 안전성을 평가하기 위해, 사고, 순환전류, CMV, 서지, 누설전류, 철공진의 안전성 평가 방안에 대해 제시하고 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS의 심각도 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 전기적 위해요인에 대한 심각도, 발생도, 검출도를 기반으로한 ESS의 안전성을 분석한 결과, DC 전로 단락이 가장 높은 위험 순위로 평가되어 보호기기를 적절하게 운용해야됨을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Hun Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple\_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28, 2019.8.
- [2] S. Y. Lim, S. Y Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector", Journal of Energy Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.12.
- [3] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, ESS utilization and related PCS technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 12-18, 2017.1.
- [4] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp. 91-99, 2018.12.