

배전계통에 있어서 Modified RPN 방식에 의한 ESS의 안전성 평가방안

김지명^{*,**}, 황승욱^{**}, 이민행^{*}, 장형안^{*}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}한국화학융합시험연구원

e-mail:kimcjd@ktr.or.kr

A Safety Evaluation Method for ESS in Distribution Systems Using Modified RPN Method

Ji-Myung Kim^{*,**}, Seung-Wook Hwang^{**}, Min-Haeng Lee^{*}, Hyeong-An Jang^{*},
Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education,

^{**}Korea Testing & Research Institute

요 약

본 논문에서는 배전계통에서 ESS의 전기적 위해요인에 대한 안전성 평가를 수행하기 위하여 사고전류, CMV, 서지의 전기적 위해요인의 발생 메커니즘을 제시하고 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 Modified RPN(risk priority number) 평가방안을 제안한다. 또한, ESS의 전기적 위해요인의 특성을 분석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 전기적 위해요인 발생장치부 등으로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 Modified RPN 평가방안과 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성을 종합적으로 분석한 결과, DC 전로 단락에 의한 사고전류의 위험도가 제일 높게 평가되며, 사고 발생 원인별로 적절한 보호방안이 요구됨을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법의 시행으로 인하여, 신재생에너지의 출력 안정화, 피크 부하 저감 및 발전기 주파수 조정 등 다양한 기능을 가진 에너지 저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 증가하고 있다[1]. 하지만, 리튬이온배터리를 이용한 ESS의 화재사고는 2017년 8월 고창에서 발생한 화재 이후 현재까지 지속적으로 발생하고 있으며, 최근에는 5년 이상 운용한 ESS 사이트의 화재가 증가하고 있는 실정이다[2]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 정부에서는 ESS의 정확한 화재 원인 파악 및 안전성 확보를 위한 ESS 화재사고 원인조사를 시행하여 원인과 대응 방안을 제시하고 있으며, ESS의 전기적 위해요인은 주요 화재 원인으로 평가되고 있다[3]. 한편, FEMA 방식에 의한 ESS의 부품별 안전성 평가 연구와 전기적 위해요인의 안전성 평가가 기존에 제시되고 있지만, ESS의 시스템 측면에서 전기적 위해요인을 고려한 안전성 평가 연구는 수행되지 않아, 이에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있는 실정이다[4].

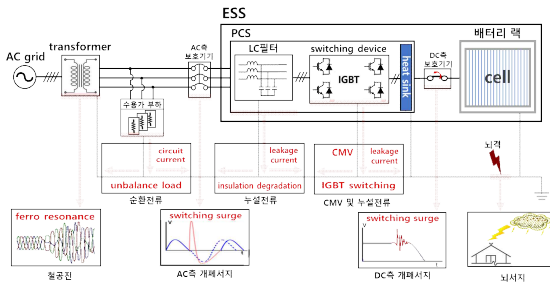
따라서, 본 논문에서는 누설전류, 순환전류, CMV, 서지, 사고전

류의 전기적 위해요인의 발생 메커니즘을 제안하고 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험 우선순위 평가방안(RPN, risk priority number)을 바탕으로, 배전계통에서 ESS의 전기적 위해요인에 대한 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전기적 위해요인의 특성을 분석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부와 PCS부, 배터리부, 전기적 위해요인 발생장치부 등을 구성된 MW급 ESS의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성을 종합적으로 분석한 결과, DC 전로 단락에 의한 사고전류의 위험도가 제일 높게 평가되며, 사고 발생 원인별 구체화된 보호대책이 요구됨을 알 수 있다.

2. 전기적 위해요인의 발생 메커니즘

ESS는 전력을 저장하고 공급하는 전기저장장치로서, 그림 1과 같이, 전력을 저장하는 배터리와 충·방전을 제어하는 PCS, 시스템의 안전성을 확보하는 보호기기 등으로 구성된다. 여기서, ESS는 접지 방식과 다수의 전력전자기기 연계로 인해 다양한 전기적 위해요인이 발생할 수 있다. 즉, ESS의 전기적 위해요인은 단락 및 지락으로 인한 사고전류, PCS의 IGBT 스위칭 동작에 의한 CMV 및 누

설전류, 계통 측의 뇌서지와 보호기기의 차단동작에 의한 개폐서지, 변압기와 전력용 커패시터 간의 철공진 현상, 그리고 불평형 부하에 의한 순환전류 등으로 분류된다.



[그림 1] 배전계통에서 ESS의 전기적 위해요인 발생 매커니즘

3. Modified RPN 방식에 의한 ESS의 안전성 평가방안

3.1 Modified RPN 방식의 정의

기존 RPN 방식은 위험 등급에 대한 분류 기준, 평가 결과의 일관성, 등의 한계성을 가지고 있으므로, ESS의 안전성을 정량적이고 종합적으로 평가하기 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 그림 2와 같이 ESS의 전기적 위해요인의 속성에 따라 “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high”로 정의한 Modified RPN 방식을 제안한다. 여기서, 심각도는 화재의 발생이나 설비 및 사용자의 안전성에 직접적으로 영향을 줄 수 있으므로 5등급으로 구성하며, 발생도와 검출도는 심각도보다 간접적으로 영향을 미치기 때문에 4등급으로 구성하여 평가한다. 상기의 RPN 방식을 바탕으로 식 (1)과 같이 심각도, 발생도, 검출도의 곱에 의하여 정량적으로 ESS의 안전성을 평가한다.

$$RPN' = S \times O \times D \quad (1)$$

여기서, RPN' : Modified RPN S : 심각도, O : 발생도, D : 검출도

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

[그림 2] Modified RPN 방식의 정의

3.2 사고전류의 안전성 평가방안

먼저, 사고전류의 심각도는 실제 사례를 반영한 사고유형과 이에 따른 사고전류의 크기를 종합적으로 고려하여 평가한다. 여기서, 사고유형은 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로, 표 1과 같이 DC측 단락과 PCS 압단락, 배터리 랙 단락, AC측 지락으로 분류한다. 즉, DC측 단락은 배터리 열폭주로 인한 화재 사례를 근거로 심각도를 “very high”로 평가하고, PCS 압 단락은 스위칭 소자의 손상으로 연계 계통과 배터리 랙에서 사고전류가 유입된 사례를 기반으로 “high”로 평가한다. 또한, 배터리 랙 단락은 결선 케이블의 손상 사례에 의하여 “medium”, AC측 지락은 배터리 랙 내부에 MC 손상 사례를 바탕으로 “medium”으로 평가하여, 총 3등급으로 분류한다.

[표 1] 사고 유형별 심각도 평가 기준

사고 유형	평가 기준	위험등급
DC측 단락	배터리 열폭주에 의한 화재 발생	very high
PCS 압단락	PCS 스위칭 소자 소손 발생	high
배터리 랙 단락	케이블 소손 발생	medium
AC측 지락	배터리 랙용 MC 소손 발생	medium

한편, 각 사고유형별 사고전류의 크기는 표 2와 같이, 배터리 열폭주로 인한 화재 발생 사례(20[kA])를 기준으로 20[kA] 이상이면 “high”로 평가하고, 사고전류가 20[kA]보다 작고 정격전류 이상이면 “medium”으로 정격전류 이하이면 “low”로 평가한다. 또한, 상용화된 DC 차단기의 용량은 50[kA] 이상의 사고전류를 차단하기 어려운 상황이므로, “very high”로 평가하여, 총 4등급으로 분류한다.

[표 2] 사고 전류 크기별 심각도 평가 기준

사고 전류 크기	평가 기준	위험등급
50[kA] 이상	DC 차단기 용량	very high
50[kA] ~ 20[kA]	배터리 열폭주에 의한 화재 발생	high
20[kA] ~ 정격전류	케이블 소손 발생	medium
정격전류 미만	배터리 랙용 MC 소손 발생	low

두 번째로, 사고전류의 발생도는 사고 유형의 외부 노출 환경에 따라, 표 3과 같이 위험등급을 분류한다. 여기서, AC측 지락 사고는 PCS의 필터의 외부 노출에 의하여 자주 발생할 가능성이 증가하여 “high”로 평가하고, PCS 압 단락은 PCS의 제어방식에 따라 발생할 가능성이 있으므로 “medium”으로 분류한다. 또한, DC 전로 단락과 배터리 랙 단락 사고는 배터리 랙이 외부에 노출되지 않고 다중 외함으로 보호되어 거의 발생하지 않으므로 “low”로 평가한다.

[표 3] 사고 전류의 발생도 평가 기준

사고 유형	평가 기준	위험등급
DC측 단락	다중 외함 보호로 발생 가능성이 적음	low
PCS 압단락	PCS 제어 방식에 따라 발생 가능성이 있음	medium
배터리 랙 단락	다중 외함 보호로 발생 가능성이 적음	low
AC측 지락	PCS 필터의 외부 노출로 발생 가능성이 높음	high

마지막으로 사고전류의 검출도는 잠재적 사고의 발견 가능 성을 나타내며, 표 4와 같이 사고 유형에 따라 보호기기의 설치 개수와 보호기능을 고려하여 평가한다. 여기서, DC측 단락과 배터리 랙 단락 사고는 상대적으로 적게 설치된 보호기기로 인해 검출도를 “high”로 평가하며, AC측 지락 사고는 IMD(insulation monitoring device)에 의하여 상시적으로 감지하지만 지연동작에 의하여 “low”으로 분류한다. 또한, PCS 압 단락 사고는 PCS 압 주변에 보호기기가 다수 설치되어 “very low”로 평가하여, 총 3등급으로 분류한다.

[표 4] 사고전류의 검출도 평가 기준

사고 유형	평가 기준	위험등급
DC측 단락	상대적 보호기기 적음	high
PCS 압단락	다수의 보호기기	very low
배터리 랙 단락	상대적 보호기기 적음	high
AC측 지락	IMD 검출 가능	low

3.3 CMV 및 서지의 안전성 평가방안

먼저, CMV와 서지의 심각도는 2.2절과 2.3절, 2.4절에서 제시한 발생 메커니즘을 바탕으로, 제시한 메커니즘을 바탕으로, 표 5와 같이 배터리의 정격과 절연내력을 기준으로 위험등급을 분류한다. 여기서, CMV와 서지의 크기가 절연내력을 수배 초과하면 “very high”, 절연내력을 초과하면 “high”, 절연내력 이하이면 “low”, 배터리의 정격전압 이하이면 “very low”로 평가하여, 총 4등급으로 분류한다.

[표 5] CMV와 서지의 심각도 평가 기준

평가 기준	위험등급
절연내력 수배 초과	very high
절연내력 초과	high
정격전압 이상 절연내력 이하	low
정격전압 이하	very low

두번째로 발생도는 표 6과 같이 IGBT 스위칭과 정상상태 개폐, 차단기 개폐, 뇌격 등의 발생빈도에 따라 위험등급을 분류한다. 여기서, IGBT 스위칭은 상시적으로 발생하므로 발생도를 “very high”, 정상상태 개폐는 ESS 충·방전에 의하여 자주 발생하므로

“high”로, 차단기 개폐는 비교적 발생 가능성이 낮으므로 “low”로 분류한다. 또한, 뇌격은 IGBT 스위칭과 정상상태 개폐, 차단기 개폐에 비해 발생확률이 낮아 “very low”로 평가하여, 총 4등급으로 분류한다.

[표 6] CMV와 서지의 발생도 평가 기준

발생 원인	위험등급
IGBT 스위칭	high
정상상태 개폐	medium
차단기 개폐	low
뇌격	very low

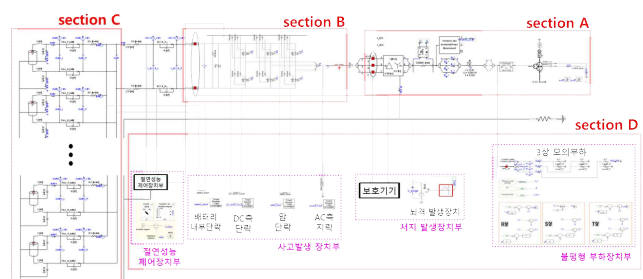
마지막으로 검출도는 표 7과 같이 CMV와 서지 크기에 반비례하여, 크기가 작을수록 위험등급을 “high”에서 “medium”, “low” 순으로 평가한다. 여기서, ESS에 필수적으로 설치되는 서지보호장치(SPD, surge protection device)는 설치 위치마다 서로 다른 정격전압(Un)과 정정치(U_p, U_c)로 운용되므로, CMV와 서지의 크기에 따라 이를 검출하지 못할 가능성이 있다.

[표 7] CMV와 서지의 검출도 평가 기준

발생 원인	위험등급
절연내력 수배 초과	very low
절연내력 초과	low
정격전압 이상 절연내력 이하	medium
정격전압 이하	high

4. ESS의 전기적 위해요인의 평가 모델링

ESS의 전기적 위해요인 평가 모델링을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, section A는 AC 전원과 배전용 변전소의 주변압기, 고압 배전선로 등으로 구성된 배전계통부, section B는 AC를 DC로 변환하는 PCS부, section C는 병렬 구조의 랙으로 구성된 배터리부를 나타낸다. 또한, section D는 사고발생장치와 서지 발생장치, 절연성능 제어장치, 불평형 부하장치로 구성된 전기적 위해요인 발생장치부를 나타낸다.



[그림 3] ESS의 전기적 위해요인 평가 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

ESS의 전기적 위해요인 모델링을 바탕으로 안전성 평가를 수행하기 위한 시뮬레이션 조건을 나타내면 표 8과 같다. 여기서, 배전계통부에서 선로 공장은 5[km], 10[km], 15[km]으로 상정하며, 연계용변압기의 결선방식은 Yg-Yg, Yg- Δ , Δ -Yg, Δ - Δ 를 고려하고, 부하 용량은 10[MVA], 접지저항은 1[Ω], 30[Ω]을 적용한다. 한편, ESS부의 PCS는 1[MW]의 정격용량으로 AC 380[V]를 DC 700[V]로 변환하며, 내부의 기생 커패시턴스는 IGBT 모듈과 방열판의 구조 및 제조회사에서 사용하고 있는 값을 고려하여 1[nF], 2[nF]으로 상정하고, PCS 외함은 3.52[Ω]을 적용한다.

[표 8] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역	
배전계통부		선로 공장 [km]	5, 15
		변압기 결선방식	Yg-Yg
			Yg-Δ
			Δ-Yg
			Δ-Δ
		부하 [MVA]	10
접지저항 [Ω]		1, 30	
ESS부	PCS	정격용량 [MW]	1
		입력전압[V _{AC}]/출력전압[V _{DC}]	380/700
		IGBT module[nF]	1, 2
		PCS 외함[Ω]	3.52
	배터리	정격전압 [kV]	0.7
		정격용량 [kAh]	1
		내부 인덕턴스 [uH]	6
		내부 리액턴스 [mΩ]	152.6
		배터리 외함[Ω]	8
		전기적 위해요인	단락저항[mΩ]
지락저항[Ω]	10		
선로 절연저항 [MΩ]	1, 20		
부하의 불평형률 [%]	5, 15, 30		
대지전위 변동률[%]	1, 3		

5.2 ESS의 안전성 평가

상기에서 제안한 안전성 평가방안에 따라 사고전류, CMV, 서지의 전기적 위해요인에 대한 RPN 평가 점수를 나타내면 표 10과 같다. 먼저, DC 전로 단락에 의한 사고전류는 144점으로 제일 위험도가 높게 나타났으며, 사고 발생 원인별 구체화된 보호대책이 요구됨을 알 수 있다. 또한, CMV는 변압기의 결선방식에 따라 위험도를 많이 낮출 수 있음을 알 수 있으며, 서지는 비교적 낮은 순위로 평가되지만 위험도가 높음으로 SPD등 보호기기를 적절히 설치해야 함을 알 수 있으며, 철공진은 5등급으로 평가되며, 철공진

현상으로 인해 설비가 손상될 경우의 손해를 고려하여 추가적인 커패시턴스, SPD 설치 등 보호방안이 요구됨을 알 수 있다.

[표 9] 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성 평가

no	항목	내역	RPN
1	사고전류	DC 전로 단락	144
2	사고전류	배터리락 단락	120
3	CMV	IGBT 스위칭, Δ -Yg	96
4	서지	정상상태시 개폐	72
5	CMV	IGBT 스위칭, Yg-Yg	64
6	서지	사고시 차단기에 의한 3상 단락	64
7	사고전류	PCS 암 단락	51
8	CMV	IGBT 스위칭, Yg- Δ	48
9	CMV	IGBT 스위칭, Δ - Δ	48
10	서지	사고시 차단기에 의한 지락	48
11	서지	뇌격	40
12	사고전류	AC측 지락	32

6. 결 론

본 논문에서는 ESS의 사고사례 분석을 통하여 누설전류, 순환전류, CMV, 서지, 사고전류의 전기적 위해요인의 발생 메커니즘을 제안하고 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험 우선순위 평가방안(RPN, risk priority number)을 바탕으로, 배전망에서 ESS의 전기적 위해요인에 대한 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전기적 위해요인의 특성을 분석하기 위하여, 30kW급 ESS의 전기적 위해요인 평가 시험장치를 구현하고 모델링을 수행하고, MW급 ESS의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인을 고려한 ESS의 안전성을 종합적으로 분석한 결과, DC 전로 단락에 의한 사고전류의 위험도가 제일 높게 평가되며, 사고 발생 원인별로 적절한 보호방안이 요구됨을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이민행 외 5명, “태양광전원의 연계용량에 따른 ± 35 kV급 MVDC 실증배전망의 경제성평가 모델링”, 한국산학기술학회 논문지, 25권, 제 2호, pp. 504-513, 2024.02.
- [2] 김지연 외 5인, “LiB 기반 무정전전원장치의 안전기술 개발”, 2023년도 대한전기학회 전기설비부분회 추계학술대회 논문집, pp. 126-127, 2023.10
- [3] Energy Storage System Industry Development Strategy, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 6, 2023.
- [4] 이예빈, 김지명, 이민행, 노성은, 김세진, 노대석, “운용환경 및 용도를 고려한 ESS의 안전성 평가방안에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol. 73, no. 5, pp. 773-783, 2024.