

50kW/100kWh급 ESS 실증시험 시스템의 개폐서지 특성에 관한 연구

김지명, 한병길, 최형석, 이명근, 노대석*

한국기술교육대학교

e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on Characteristics of Switching Surge in Test System for 50kW/100kWh Class ESS

Ji-Myung Kim, Byeong-Gill Han, Hyoung-Seok Choi, Myung-geun Lee, Dae-Seok Rho*

Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 개폐서지는 ESS 배터리 안전성에 악영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 다양한 목적을 가지고 설치되는 ESS의 안정적인 운용을 위하여, 불평형부하부, 선로모의장치부, PCS부, ESS부, 서지보호장치(surge protection device, SPD) 등으로 구성된 50kW/100kWh급 ESS 실증 시험 시스템을 모델링하고, SPD 설치 유무에 따른 개폐서지의 특성을 평가한다. 또한, 상기의 모델링의 유효성을 확인하기 위하여, SPD가 설치된 50kW 용량의 PCS와 100kWh 용량의 리튬이온배터리, 선로모의장치 등으로 구성된 50kW/100kWh급 실증시험 시스템을 구현하여, 배터리의 개폐기 동작, PCS측 DC 차단기 및 AC 차단기 동작시에 발생하는 개폐서지에 따른 특성을 평가한다. 여기서, 다양한 상정 조건을 바탕으로 개폐기 및 차단기의 동작에 의한 DC측 개폐서지를 측정된 결과, SPD가 설치되지 않은 경우, 배터리의 개폐기가 동작함에 따라 정상상태의 DC 전압을 3배 이상 초과하는 개폐서지가 발생할 수 있으며, SPD에 의하여 약 16% 정도 서지가 저감됨을 알 수 있었다.

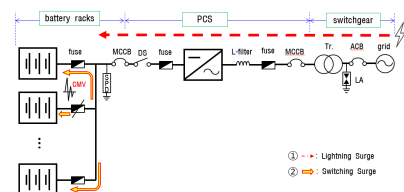
1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생 에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능이 있는 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 급격하게 증가하고 있다[1]. 그러나 2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 화재로 시작으로 현재까지 지속적으로 ESS 화재사고가 발생하고 있어, ESS 산업 시장에 큰 피해를 주고 있다. 이에 따라, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 개폐서지는 ESS 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 다양한 목적을 가지고 설치되는 ESS의 안정적인 운용을 위하여, 불평형부하부, 선로모의장치, PCS, ESS, 서지보호장치 등으로 구성된 50kW/100kWh급 ESS를 모델링 및 구현하고 개폐서지에 대해 평가를 수행한다. 다양한 조건에서 배터리측 DC 전압의 개폐서지를 측정된 결과, 배터리측 개폐기가 동작함에 따라 DC 전압보다 3배정도 높은 개폐서지가 발생함을 알 수 있어, ESS가 운용되는 환경의 면밀한 SPD 용량 산정이 요구됨을 알 수 있다.

2. ESS용 SPD의 특성 분석

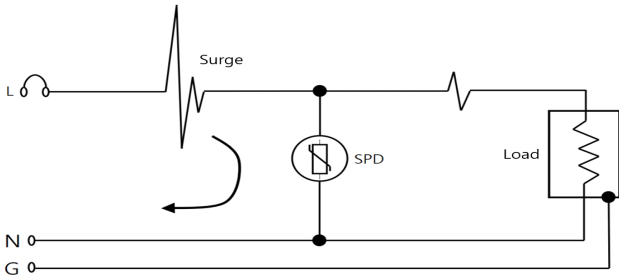
2.1 개폐서지 보호 메커니즘

일반적으로, ESS는 그림 1과 같이 병렬연결된 다수의 배터리 랙과 충·방전을 수행하는 PCS, 연계용변압기, 보호기기 등으로 구성된다. 이러한 구성에서 뇌격에 의해 서지가 발생할 경우(그림 1의 ①), 전원선과 각종 신호선 및 통신선 등 다양한 경로를 통해 유입되어, 각종 전기설비 및 제어설비의 파손과 기기의 오동작을 야기시킬 수 있다. 또한, 배터리 랙측 또는 PCS측에서 사고가 발생하는 경우, 퓨즈 또는 차단기가 동작하여(그림 1의 ②), 순간적으로 매우 큰 개폐서지가 발생하고, 절연강도가 약한 부분에서 절연이 파괴되어, 2차 사고를 유발하여 ESS의 화재로 진행될 가능성이 있다.



[그림 1] 개폐서지 발생 메커니즘

한편, SPD는 서지로부터 각종 장비들을 보호하는 장치이며, 내부구조, 동작방식, 등급시험 등에 따라 분류될 수 있다. 즉, 어떠한 이유로 인해 계통에 서지가 들어올 때, 그림 2와 같이 서지 전류가 부하를 통하지 않고 SPD를 통해 흐르도록 하여 부하를 보호하는 장치이다. SPD에 주로 사용되는 MOV는 정상상태에서 매우 큰 임피던스를 가지며, 여기에 전압 서지가 걸리면 MOV의 임피던스가 급격히 낮아지면서 서지를 부하가 아닌 다른 통로로 흘려보내는 저임피던스 통로가 되므로, SPD를 통해 전류를 방출하여 전압이 크게 상승하지 않는다.



[그림 2] 개폐서지 보호 메커니즘

2.2 전기저장장치용 SPD의 운용사례 분석

ESS 설치현장에서는 서지로부터 배터리를 보호하기 위하여 SPD를 사용하고 있지만, DC측에 설치되는 SPD에 대한 명확한 기준이 제시되지 않아, 표 1과 같이 유사한 PCS의 용량과 DC측 전압을 가진 사이트에서도 서로 다른 용량(U_c , U_p)의 SPD가 설치되고 있는 실정이다. 여기서, KS C IEC 60099-7의 용어 정의에 따라, 전로의 공칭전압(U_n)은 SPD를 적용할 계통의 공칭선과 중성선 사이의 전압을 뜻하고, 절연내력(U_w)은 과전압에 대한 기기 또는 전로의 절연내력을 의미한다. 또한, 최대연속 사용전압(U_c)은 SPD에 연속적으로 가할 수 있는 최대 실효 전압값을 나타내는데, 일반적으로 U_c 값 미만에서 SPD의 방전전류는 1mA 미만이다. 한편, 전압보호레벨(U_p)은 뇌서지로 인해 SPD에 명시된 공칭 방전전류(I_n , 10~40kA)가 흐를 때, SPD 양단에서 측정되는 최대전압(제한전압)을 의미한다. 이러한, SPD의 용량은 SPD의 보호모드(결선방식)와 설치방법(공통/차동모드)에 따라 적정하게 선정되어야 하지만, 현장에서는 이를 충분히 고려하지 못하여 부적합한 SPD가 설치되고 있다. 따라서 계통에서 발생한 서지에 대한 보호성능이 충분하지 않아, 배터리측에 절연내력을 초과하는 서지가 전달되어 화재사고의 원인이 될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 SPD 설치 유무에 따른 개폐서지의 특성을 분석한다.

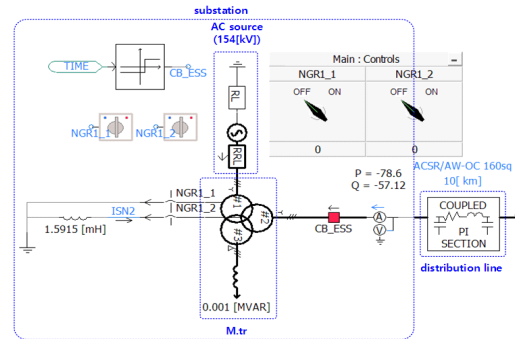
[표 1] 설치현장별 SPD의 용량

설치현장	PCS 용량	DC 전압	SPD 용량		
			U_n	U_c	U_p
A site	100[kW]	728.6[V]	1,000[V]	1,170[V]	3,700[V]
B site	100[kW]	741.2[V]	1,000[V]	1,200[V]	3,900[V]
C site	1[MW]	925[V]	1,000[V]	1,300[V]	3,900[V]
D site	1[MW]	956.5[V]	1,000[V]	1,500[V]	4,500[V]
E site	2[MW]	975.7[V]	1,500[V]	1,500[V]	4,500[V]

3. 50kW/100kWh급 ESS의 실증 시험 시스템 모델링

3.1 배전계통부

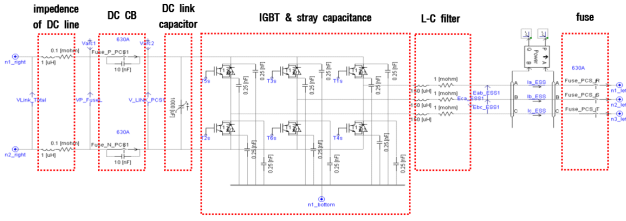
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부의 모델링을 수행하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3 고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR이 설치되는 것으로 상정한다. 그리고 배전선로는 3상 4선식의 π 형 등가회로이며, 선종은 ACSR 160[mm²]로 상정한다.



[그림 3] 배전계통부 모델링

3.2 PCS부

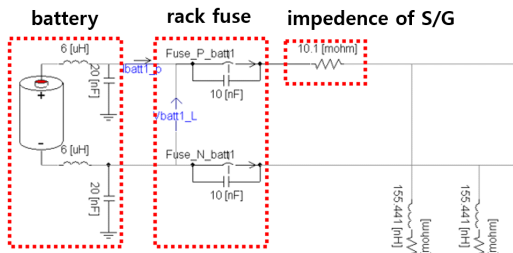
배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 4와 같이, DC 전로, 퓨즈, DC-Link 커패시터, IGBT 모듈, L-C 필터, 기생 커패시턴스 등으로 구성된다. 여기서, DC 전로는 배터리 랙 간의 전선과 PCS간의 전선으로 구성되며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다. 또한, L-C 필터는 변환된 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행하며, IGBT 모듈은 DC 전원을 120[°] 위상차를 갖는 3상 AC로 변환한다. 한편, IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스는 각 IGBT에 병렬로 구성하여 모델링한다.



[그림 4] PCS부 모델링

3.3 배터리부

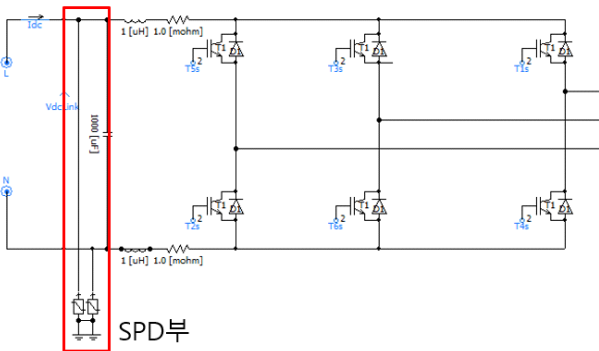
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리부를 모델링하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 배터리부는 배터리 랙의 병렬연결로 구성되며, 배터리 랙은 100[kWh]의 용량을 가지고 랙 퓨즈, 기생 커패시턴스, S/G 임피던스로 구성된다.



[그림 5] 배터리부 모델링

3.4 서지보호장치부

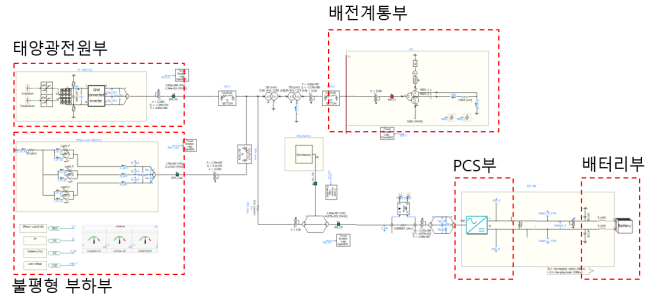
배터리 및 장비의 절연내력 이상의 전압으로 부터 배터리와 장비를 보호하기 위하여, PCS에 설치된 서지보호장치 (surge protection device, SPD)를 나타내면 그림 6과 같다. SPD는 양 극에 각각 설치하여 운용한다.



[그림 6] 서지보호장치부 모델링

3.5 전체 시스템

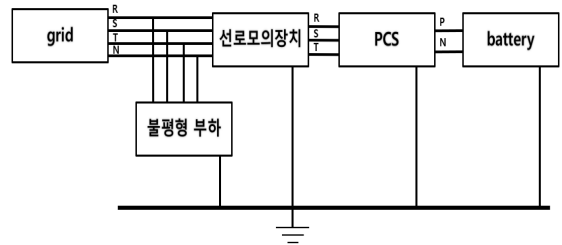
배전계통부, PCS부, 배터리부 등으로 구성된 전체 시스템을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, PCS부에는 서지보호장치가 설치되어 있어 서지보호장치 유무에 따른 개폐서지 특성을 분석한다.



[그림 7] 전체 시스템 모델링

4. 50kW/100kWh급 ESS의 실증 시험 시스템 구현

상기에서 제시한 누설전류 및 개폐서지를 평가하기 위하여 불평형부하, 선로모의장치, PCS, 배터리 등으로 구성된 50kW/100kWh급 ESS는 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, PCS는 50kW용량으로 IMD와 SPD가 설치되어 있어 개폐서지가 발생할 경우, 배터리 및 설비의 보호를 수행할 수 있다.



[그림 8] 50kW/100kWh급 실증 시험 시스템의 구성

5. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험조건

개폐서지 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 및 시험조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 개폐서지는 배터리의 SOC가 30%인 조건에서, 충전 및 방전동작을 수행하는 동안 PCS측의 AC 차단기, DC 차단기, 배터리측의 DC 개폐기를 동작시켜 평가한다.

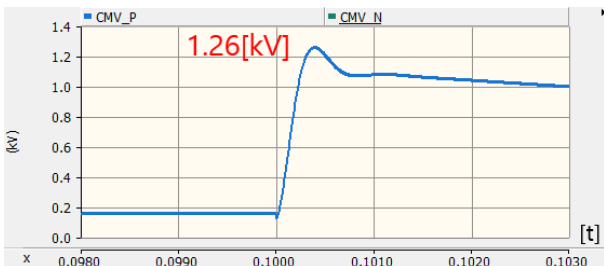
[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

시험	항목	내용	
개폐서지 시험	SOC[%]	30	
	SPD Up[kV]	1.170	
	보호기 동작	배터리측 DC 개폐기	
		PCS측 DC 차단기	
		PCS측 AC 차단기	

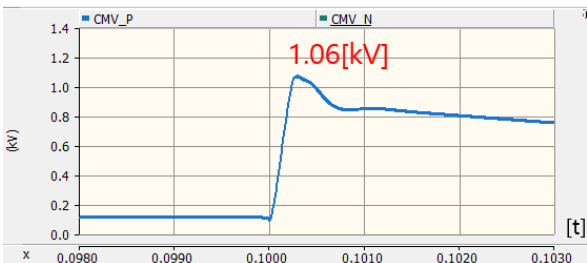
5.2 모델링에 의한 개폐서지 특성분석

배터리의 SOC가 30%인 조건에서 SOD가 설치되지 않은

경우, 배터리의 개폐기 동작시 개폐서지 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 배터리가 투입될 경우 개폐서지는 배터리 전압의 3배를 초과하는 1.26kV 정도 발생함을 알 수 있다. 또한, SPD가 설치된 경우 배터리 투입 시 개폐서지 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 배터리가 투입될 경우 개폐서지는 1.06kV 정도 발생하여, 개폐서지가 설치되지 않은 경우보다 약 16% 저감됨을 알 수 있다. 한편, 상기와 동일한 방식으로 휴지시 배터리 투입, 방전 중 배터리측 DC 개폐기 동작, 방전중 PCS측 강제 탈락 시의 개폐서지 특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, SPD에 의해 제일 많이 저감된 개폐서지는



[그림 9] SPD가 설치되지 않은 경우, 배터리측 DC 개폐기 동작에 의한 개폐서지 특성



[그림 10] SPD가 설치된 경우, 배터리측 DC 개폐기 동작에 의한 개폐서지 특성

[표 2] SPD설치 유무에 따른 개폐서지 특성

보호기 동작	개폐서지 전압[kV]	SPD에 의한 저감률[%]
배터리측 DC 개폐기	1.26	16
PCS측 DC 차단기	0.845	3
PCS측 AC 차단기	0.517	0

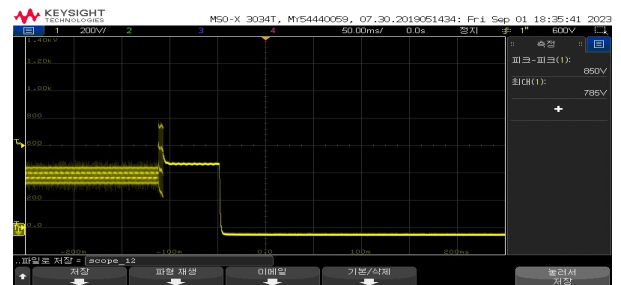
5.3 시험 장치에 의한 개폐서지 특성분석

배터리의 SOC가 30%인 조건에서 휴지시 배터리 투입, 방전 중 배터리측 DC 개폐기 동작, 방전중 PCS측 강제 탈락 시의 개폐서지 특성을 각각 나타내면 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같다. 여기서, 배터리가 투입될 경우 개폐서지는 배터리 전압의 3배 정도인 약 1.07kV가 발생하며, 방전 중 배터리 개폐기 동작시 개폐서지는 배터리 전압의 2배정도인 약 796V가 발생함을 알 수 있다. 또한, 방전 중 PCS를 강제

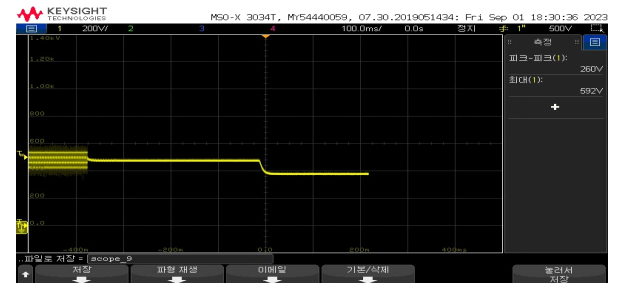
탈락 시켰을 경우에는 발생한 개폐서지가 매우 작음을 알 수 있어, 본 논문의 시뮬레이션 결과가 유효함을 알 수 있었다.



[그림 11] 배터리측 DC 개폐기 동작시 개폐서지 특성



[그림 12] 배터리측 DC 개폐기 동작시 개폐서지 특성



[그림 13] PCS 강제 탈락시 개폐서지 특성

6. 결 론

본 논문에서는 다양한 목적을 가지고 설치되는 ESS의 안전적인 운용을 위하여, 50kV/100kW급 ESS를 모델링 및 구현하고 전기적위해요인 중 개폐서지에 대해 평가를 수행한다. 다양한 조건에서 배터리측 DC 전압의 개폐서지를 측정된 결과, 배터리의 개폐기 동작함에 따라 DC 전압보다 3배정도 높은 개폐서지가 발생함을 알 수 있어, ESS가 운용되는 환경의 면밀한 SPD 용량 산정이 요구됨을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 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.