

배터리 용량 및 사고위치를 고려한 ESS의 사고전류 특성에 관한 연구

김윤호, 태동현, 김경화, 유현상, 노대석
한국기술교육대학교

e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

A Study on Fault Current Characteristics in ESS Considering Battery Capacity and Fault Location

Yun-Ho Kim, Dong-Hyun Tae, Kyung-Hwa Kim, Hyeon-Sang Yu, Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 다양한 용도로 설치되어 운용중인 ESS에서 지속적으로 화재사고가 발생하여 국내 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있다. 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 지속적인 조사를 시행하여 화재사고에 대한 원인을 제시하고 있는데 그 중, 단락 및 지락에 의한 사고전류도 배터리에 악영향을 미치는 전기적인 위해요인으로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 배터리 용량 및 배터리 직류측, PCS 내부에서 발생하는 단락 및 지락에 따른 사고전류 특성을 분석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 PCS부, 배터리부, 수배전설비부, 등으로 구성된 실증 사이트의 ESS의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 배터리 용량과 사고위치에 따른 시뮬레이션을 수행한 결과, PCS의 L-C filter에서 지락사고 발생 시, 사고전류가 지락지점으로 거의 흐르지 않음을 알 수 있지만, 배터리 용량 및 사고위치에 따라 사고전류가 상당한 크기로 증가하여 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위해서 신재생에너지원의 도입이 증가함에 따라, 신재생에너지의 간헐성 보완 및 전력소비를 효율화 할 수 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 수요가 급격하게 증가하고 있다. 그러나, 2017년 8월에 고창 전력연구원 시험장에서 ESS 화재사고가 발생한 이후, 지속적으로 화재사고가 발생하여 국내 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 사고원인에 대한 조사를 시행하여, 화재사고에 대한 원인을 제시하고 있는데 그 중, 배터리 직류측, PCS 내부에서 발생하는 사고전류도 중요한 전기적인 위해요인으로 고려되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 PCS부, 배터리부, 수배전설비부, 등으로 구성된 ESS의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, PCS의 L-C filter에서 지락사고 발생 시, 사고전류가 지락지점으로 거의 흐르지 않으며 이를 통해, 배터리에 영향을 미칠 가능성이 낮음을 알 수

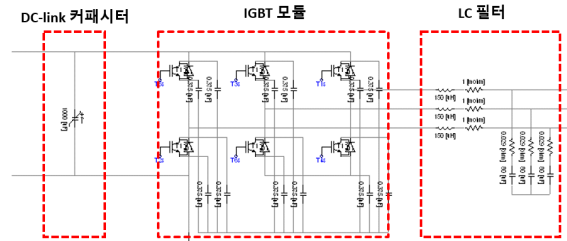
있고 배터리 용량 및 사고위치에 따라 사고전류가 상당한 크기로 증가하여, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 알 수 있었다.

2. 배터리 용량 및 사고위치에 따른 사고전류 특성

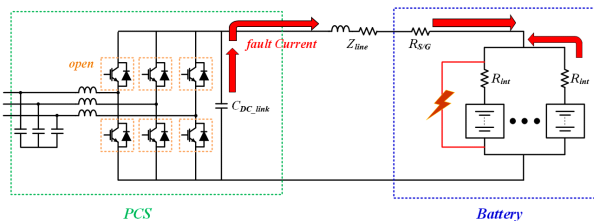
ESS의 배터리 용량 및 사고위치에 따른 사고전류 특성을 나타내면 그림 1과 같다. ESS의 배터리측에서 단락사고가 발생하는 경우 그림 1의 (a)와 같이, PCS의 IGBT는 자기보호 동작을 통해 빠르게 개방되고 DC-link 커패시터에 충전된 에너지가 방전함에 따라 단락지점으로 큰 전류가 흐르게 되며, 배터리측에서는 전압원과 내부저항, DC 전로 임피던스, 단락 저항으로 구성된 RL 직렬 회로로 구성 되기 때문에 단락지점으로 큰 전류가 흐르게 된다[1]. 한편, 그림 1의 (b)와 (c)와 같이 PCS 내의 IGBT Arm 또는 L-C filter에서 단락 및 지락사고가 발생하는 경우 PCS의 AC측과 배터리측에서 사고지점으로 큰 전류가 흐르게 된다. 이때, 사고발생 위치에 따라 단락저항 및 지락저항이 달라질 수 있으며, 배터리의 용량과 연

결방식에 따라 배터리 내부저항이 변동되어 사고전류에 큰 영향을 미칠 가능성이 있다. 또한, “기관합동 ESS 화재사고 원인조사위원회(1차) 보고서”에 따르면 ESS 구성품 및 시스템 단위로 실험을 수행한 결과, 배터리 보호장치 내 부품에서 단락이 발생하는 경우 직류접촉기가 폭발하여 배터리 보호장치의 외함에서 2차 단락사고가 발생하여 배터리에서 화재가 발생할 가능성이 있으며, PCS 내부의 스위칭 소자의 단락이 발생하는 경우, 계통과 배터리측에서 PCS로 대전류가 유입된다. 또한, 교류측 필터가 외함에 닿는 지락사고를 모사한 결과 배터리측에 전기충격이 발생하여, 직류접촉기의 절연성능을 저감시킬 가능성이 있음을 알 수 있다[2].

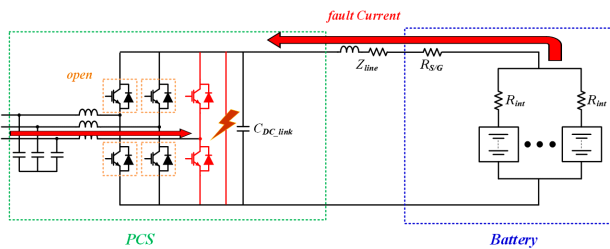
한다. 또한, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하는 역할을 수행하고 IGBT의 기생 커패시턴스는 2개의 IGBT 소자에 0.375[nF] 씩 4병렬로 구성하며, IGBT의 스위칭 주파수는 5[kHz]로 상정한다[3-4].



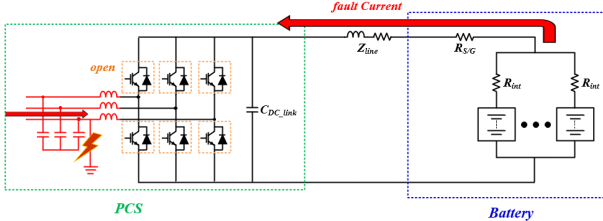
[그림 2] PCS부 모델링



(a) 배터리측 단락 시



(b) PCS Arm 단락 시



(c) PCS L-C filter 지락 시

[그림 1] 배터리 용량 및 사고위치에 따른 사고전류 특성

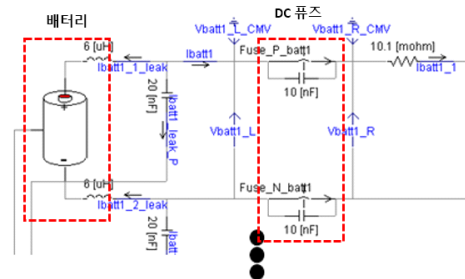
3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 모델링

3.1 PCS부 모델링

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 2와 같이, L-C 필터, DC-Link 커패시터, IGBT 모듈, 등으로 구성된다. 여기서, L-C필터는 AC전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행하며 리액터는 150[μH], 커패시터는 80[μF]로 상정하고, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC 측의 전압을 안정시키는 역할을 수행하며 1000[μF]로 상정

3.2 배터리부 모델링

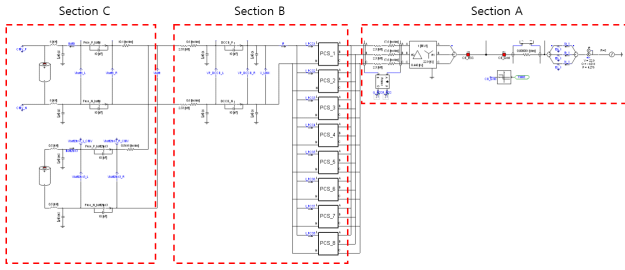
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리부를 모델링하면, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리부는 배터리와 DC 퓨즈로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생 커패시턴스, 전압원으로 구성되며, 배터리의 내부 임피던스는 150[mΩ], 기생커패시턴스는 20[nF]로 상정한다. 한편, 배터리 S/G 임피던스는 10.1[mΩ]으로 상정하고, DC 퓨즈의 기생커패시턴스는 10[nF]으로 가정한다. 또한, 배터리부는 1번 배터리랙을 제외한 나머지 배터리랙은 하나의 랙으로 등가화 시킨다.



[그림 3] 배터리부 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4의 Section A는 수용가의 계통전원, 차단기, 수배전용 변압기로 구성된 수배전설비부를 나타낸다. 또한, 수배전용 변압기는 Yg-결선방식을 사용하며, 변압비는 22.9kV/380V이고, 2차측은 3상 4선식 저압 배전선로로 구성된다. 한편, Section B는 IGBT 모듈, DC-Link커패시터, L-C필터 등으로 구성된 PCS부이며, Section C는 배터리와 퓨즈로 구성된 배터리부를 나타낸다.



[그림 4] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

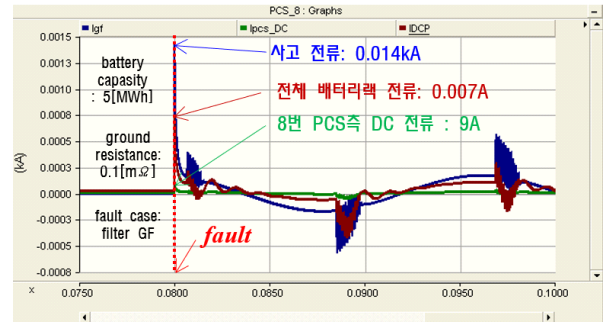
배터리 용량 및 사고위치에 따른 ESS의 사고전류 특성을 분석하기 위하여, 사고유형, 사고위치, 배터리 용량, 등을 고려한 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, 사고위치는 배터리측, PCS의 Arm에서 단락이 발생한다고 가정하며, PCS의 L-C filter에서 지락사고가 발생한다고 가정한다. 또한, 배터리측 단락사고는 1번 배터리랙, Arm 단락사고는 8번 PCS에서 발생한다고 가정하고, L-C filter 지락사고는 8번 PCS에서 1선 지락이 발생한다고 가정한다. 여기서, 단락저항은 배터리측 단락사고의 경우 0.1[mΩ], 3[mΩ], 30[mΩ], Arm 단락사고의 경우 0.1[mΩ], 8.4[mΩ]으로 상정하며, 지락저항은 0.1[mΩ], 8.4[mΩ]으로 상정한다. 또한, 배터리 용량은 1[MWh], 5[MWh]로 상정하고, PCS는 125[kW]급 unit 8개를 병렬로 구성하여 1[MW]로 구성한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

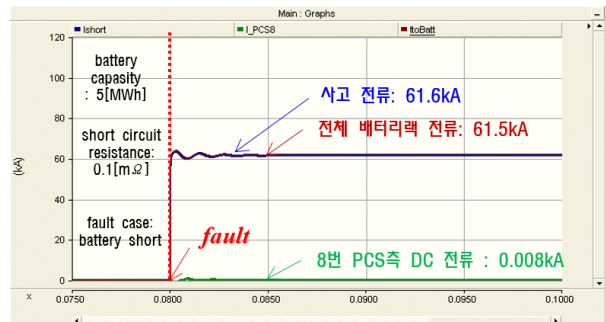
항 목	내 역			
	사고유형	사고발생 위치	단락/지락 저항	배터리 용량
Case 1	단락	배터리측	0.1[mΩ]	1[MWh]
Case 2	단락	배터리측	0.1[mΩ]	5[MWh]
Case 3	단락	배터리측	3[mΩ]	1[MWh]
Case 4	단락	배터리측	3[mΩ]	5[MWh]
Case 5	단락	배터리측	30[mΩ]	1[MWh]
Case 6	단락	배터리측	30[mΩ]	5[MWh]
Case 7	단락	PCS Arm	0.1[mΩ]	1[MWh]
Case 8	단락	PCS Arm	0.1[mΩ]	5[MWh]
Case 9	단락	PCS Arm	8.4[mΩ]	1[MWh]
Case 10	단락	PCS Arm	8.4[mΩ]	5[MWh]
Case 11	지락	PCS filter	0.1[mΩ]	1[MWh]
Case 12	지락	PCS filter	0.1[mΩ]	5[MWh]
Case 13	지락	PCS filter	8.4[mΩ]	1[MWh]
Case 14	지락	PCS filter	8.4[mΩ]	5[MWh]

4.2 사고위치 및 배터리 용량에 따른 사고전류 특성

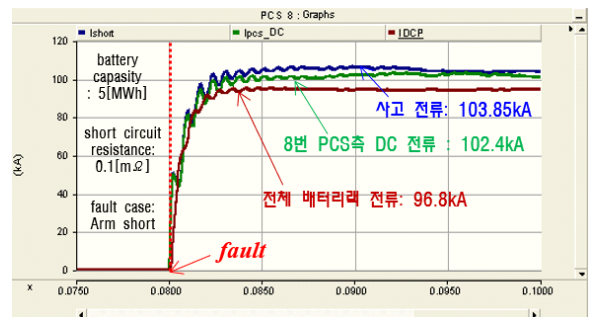
상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 사고위치에 따른 사고특성을 나타내면 그림 5와 그림 6, 그림 7과 같다. 여기서, 그림 5는 PCS filter 지락사고의 사고특성을 나타내며, PCS filter 지락사고가 발생하는 경우 배터리랙, PCS DC 측에서 지락지점으로 전류가 거의 흐르지 않으며, 사고전류의 크기가 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 한편, 그림 6과 그림 7은 배터리 용량과 단락저항이 동일한 조건에서 배터리측 단락 시와 PCS Arm 단락 시의 사고특성을 나타낸다. 여기서, 배터리 용량을 5[MWh], 단락저항을 1[mΩ]으로 동일하게 가정할 경우 사고위치에 따른 사고전류 특성을 분석하면, PCS Arm 단락사고가 배터리측 단락사고보다 사고전류가 최대 1.68배, 전체 배터리랙 전류가 최대 1.57배 정도 높게 나타남을 알 수 있다.



[그림 5] PCS filter 지락 시 사고전류 특성 (Case 12)

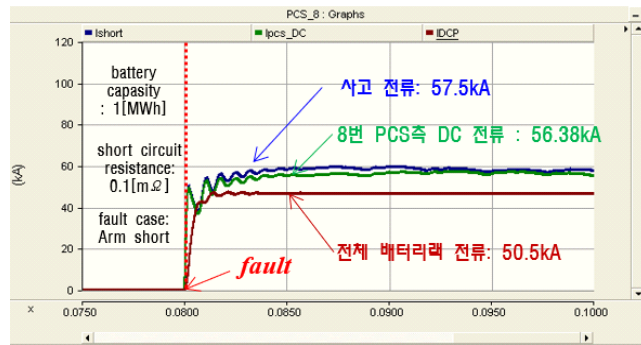


[그림 6] 배터리측 단락 시 사고전류 특성 (Case 2)



[그림 7] PCS Arm 단락 시 사고전류 특성 (Case 8)

한편, 배터리 용량에 따른 사고전류 특성을 나타내면 그림 7과 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고위치를 PCS Arm, 단락저항을 0.1[mΩ]으로 동일하게 가정할 경우, 배터리 용량이 1[MWh]에서 5[MWh]로 증가함에 따라 사고전류가 최대 1.8배, 전체 배터리락 전류가 최대 1.9배 정도 증가함을 알 수 있다. 여기서, 동일한 단락저항 조건에서 배터리측 단락사고가 발생하는 경우 배터리 용량이 증가할수록, PCS DC측에서 단락지점으로 유입되는 전류가 감소하고, PCS Arm 단락사고가 발생하는 경우 배터리 용량이 증가할수록, 배터리측과 단락이 발생하지 않은 PCS측에서 단락이 발생한 PCS측으로 유입되는 전류가 증가함을 알 수 있다. 한편, 모든 조건에 대한 사고전류 특성을 나타내면 표 2와 같다.



[그림 8] PCS Arm 단락 시 사고전류 특성 (Case 7)

[표 2] 사고위치 및 배터리 용량에 따른 사고전류 특성

항 목	내 역(단위 : [kA])			
	사고전류	전체 배터리락 전류	7번 PCS DC 전류	8번 PCS DC 전류
Case 1	41.4	37.9	0.435	
Case 2	61.6	61.5	0.008	
Case 3	36.2	33.7	0.3	
Case 4	51.3	51.2	0.004	
Case 5	17.3	17.2	0.004	
Case 6	20.5	20.5	0.004	
Case 7	57.5	50.5	1.42	56.38
Case 8	103.8	96.8	1.16	102.4
Case 9	36.5	34.1	0.54	35.2
Case 10	52.2	51.7	0.08	51
Case 11	0.014	0.0068	0.0076	0.00781
Case 12	0.014	0.007	0.0076	0.00781
Case 13	0.014	0.0068	0.0076	0.00774
Case 14	0.014	0.007	0.0076	0.00781

5. 결 론

본 논문에서는 배터리 용량 및 사고위치에 따른 사고전류의 특성을 분석하기 위해, PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 시뮬레이션을 수행한 결과 PCS L-C filter측에 지락이 발생하는 경우, 사고전류 및 전체 배터리락에서 유출되는 전류가 매우 적어 배터리에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한, 동일한 배터리 용량 및 단락저항 조건에서 PCS Arm 단락사고가 배터리측 단락사고보다 최대 1.68배, 전체 배터리락 전류가 최대 1.57배 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 한편, 배터리 용량에 따라 사고전류가 최대 1.8배, 전체 배터리락 전류가 최대 1.9배 정도 증가함을 알 수 있다. 이를 통해, 배터리 용량 및 사고위치에 따라 사고전류가 크게 증가할 수 있으며, 이는 ESS의 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 최성문, “수요관리용 ESS가 설치된 고압 수용가의 보호 협조기기 운용알고리즘에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, 22권 12호 pp. 437-446, 2021.
- [2] 산업통상자원부, “민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회 1차년도 보고서”, 2019.06
- [3] 김지명, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 누설전류 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 22권 12호 pp. 810-818, 2021.02
- [4] 김승호, “리튬이온전지를 사용하는 ESS에서 CMV 및 누설전류의 발생원인과 저감방법에 관한 연구”, 전기학회 논문지, 70권 1호 pp. 61-71, 2021.01