

PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 누설전류 발생 메커니즘에 관한 연구

김지명*, 정재범*, 이후동*, 한병길*, 노대석*
 *한국기술교육대학교 전기공학과
 e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on Mechanism of Leakage Current in ESS using PSCAD/EMTDC

Ji-Myung Kim*, Jae-Beom Jung*, Hu-Dong Lee*, Byeong-Gill Han*, Dae-Seok Rho*
 *Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 다양한 목적으로 설치되어 운용중인 전기저장장치(energy storage system, ESS)에서 총 29건의 화재사고가 보고되고 있다. 이에 대한 사고의 원인은 정확하게 규명되고 있지 않지만, ESS로 유입되는 누설전류도 중요한 전기적인 위해요인으로 고려되고 있다. 이러한 누설전류로 인하여 ESS 외함의 누설전류 안전기준을 초과할 수 있고, 완충상태의 배터리가 지속적인 충전 상태에 놓일 수 있으며, ESS의 BMS(battery management system)에 영향을 미쳐 통신오류를 일으킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 사고 사이트 중 하나인 ESS를 대상으로 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 전체 시스템 및 계통불평형을 모델링하고, 정상상태 운전 및 대기상태 시 발생하는 누설전류의 특성을 평가한다.

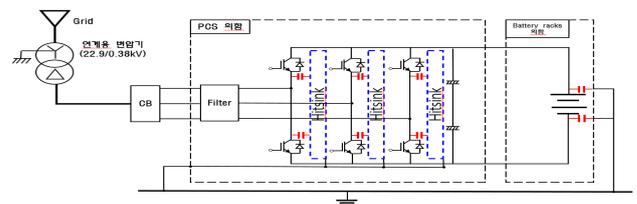
1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생 에너지원의 출력 안정화, 수급관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS의 설치가 급격하게 증가하고 있다. 그러나 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 재산피해가 보고되고 있다. 2017년 8월에 고창 전력시험센터에서 발생한 ESS의 화재를 시작으로 경산 변전소의 F/R용 ESS, 군산 태양광발전연계용 ESS 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하였다[1]. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 사고원인에 대한 조사를 시행하여, 화재사고에 대한 원인을 제시하였는데, 그 중에서 전기적인 위해요인으로 누설전류도 주요 원인 중 하나로 고려되고 있다[2-3]. 이러한 누설전류로 인하여 ESS 외함의 누설전류 안전기준을 초과할 수 있고, 완충상태의 배터리가 지속적인 충전 상태에 놓일 수 있으며, ESS의 BMS에 영향을 미쳐 통신오류를 일으킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 사고 사이트 중 하나인 ESS를 대상으로 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS 전체 시스템을 모델링하고, 정상상태 운전 시와 대기상태 시 발생하는 누설전류의 특

성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 정상상태 운전 시 IGBT측 기생 커패시턴스에 의해 발생한 누설전류가 ESS측으로 유입되는 것을 알 수 있었고, 대기상태 시 계통측 불평형에 의해 생기는 누설전류가 ESS와 PCS 외함으로 유입되는 것을 알 수 있었다.

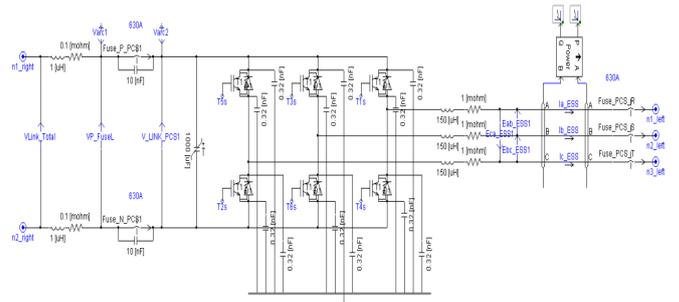
2. ESS의 누설전류 발생 메커니즘

IGBT는 전력 변환을 위해 고주파로 스위칭하며, 이로 인한 온도상승을 억제하기 위해 방열판(Hit sink)과 함께 설치된다. PCS가 정상운전할 때, 그림 1에서와 같이 IGBT의 고주파 스위칭으로 인해 방열판에 기생 커패시턴스가 발생하게 되며, 이는 PCS 외함 접지를 통하여 누설전류로 흘러, 공통 접지를 통해 묶여있는 배터리 외함으로 유입될 가능성이 있다.

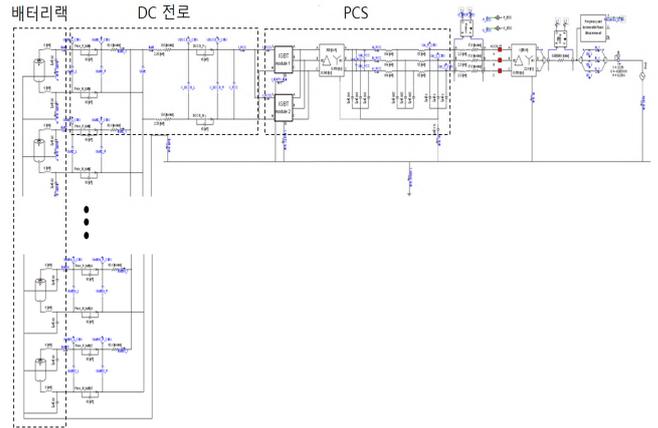


[그림 1] ESS 시스템 구성도

또한, PCS가 대기하고 있을 때, 그림 2에서와 같이 공통접지로 인하여, 계통불평형에 의해 생기는 누설전류가 ESS 시스템으로 유입된다. 이때, 유입되는 누설전류는 공통 접지를 통해 대지로 모두 흘러가지 않고 PCS와 ESS의 외함측으로 유입될 가능성이 있다. 만약 누설전류가 충분히 크고 외함을 통해 ESS측으로 유입될 경우, 누설전류 안전 기준인 전기설비 기술기준 1[mA]를 초과할 수 있고, 유입된 누설전류가 완충된 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 또한, 표 1에서와 같이 누설전류는 배터리 BMS에 통신오류를 야기시켜, ESS 화재 요인의 하나로 평가되고 있다.



(a) IGBT 및 기생 커패시턴스 모델링



(b) 전체 시스템 모델링

[그림 2] ESS시스템 공통접지 구성도

[표 1] ESS사고 장소 및 사고 원인

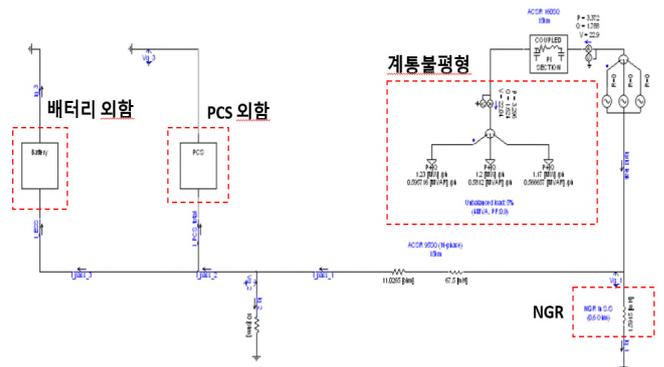
사업장	용도	용량	사고원인
고창 변전소	해상풍력 연계	17MWh	온도상승(BMS오류)
경산 변전소	주파수 조정(FR)	12MWh	BMS오류
연암 풍력	풍력 연계	15MWh	BMS오류
군산 태양광	태양광 연계	19MWh	조사중
해남 태양광	태양광 연계	3MWh	조사중
거창 풍력	풍력 연계	9.6MWh	BMS오류
세종 아세아제지	피크제어용	18MWh	작업자 부주의

[그림 3] PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS 시스템 모델링

또한, 그림 4의 계통불평형은 선로 길이 15[km], 용량 4[MVA], 역률 0.9[PF], 불평형율 5[%]로 상정한다. 또한 불평형 계통측 접지에는 중성점 접지 저항기(neutral grounding resistor, NGR)를 모델링하며 일반적으로 사용하는 용량의 0.6[Ω]으로 상정한다.

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의 누설전류 특성 모델링

PCS가 정상상태에서 운전 중일 때 IGBT측에서 발생하는 누설전류와 대기중일 때 계통 불평형에 의해 유입되는 누설전류를 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용해 배터리랙, DC전로, PCS를 포함한 전체 시스템과 계통불평형 및 외함의 저항을 모델링하면 그림 3과 그림 4와 같다. 여기서, 그림 3(a)는 PCS 내부의 IGBT와 기생 커패시턴스를 나타내고, 그림 3(b)는 전체 시스템의 모델링을 나타낸다. 또한, 배터리는 1[MWh]이고, PCS는 125[kW] 두 대를 사용한 250[kW]이며, PCS 변환기와 연계용 변압기는 각각 0.34/0.38[kV], 0.38/22.9 [kV]의 Δ-Yg 변압기로 상정한다.



[그림 4] PSCAD/EMTDC를 계통불평형에 의한 누설전류 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 모델링을 바탕으로, PCS 정상운전 시와 대기 시에 ESS의 누설전류 특성을 분석하기 위하여, 표 2와

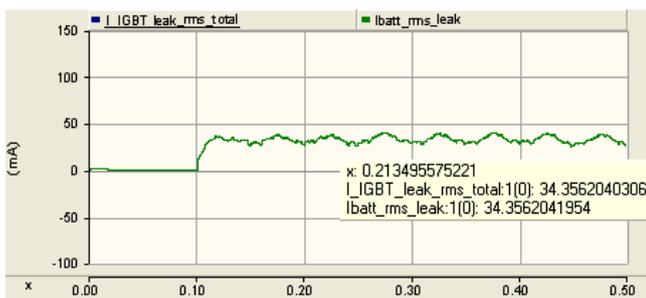
같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배터리팩은 0.7[kV] 기준으로 1[kAh]의 용량을 가지며, 내부 인덕턴스 및 내부 저항은 각각 6[uH], 152.6[mΩ]이고 15개를 병렬 연결하여 총 1.05[MWh]의 용량으로 상정한다. 또한, 배터리측 및 DC 전로 커패시턴스는 선로 커패시턴스 유도식을 통해 선로당 30[m], 4선 병렬을 기준으로 22[nF]으로 가정하고, IGBT 측 기생 커패시턴스는 방열판의 유도 용량식을 이용하여 0.32[nF]으로 상정한다[4-5]. 또한, 공통접지측 저항은 1중 접지 기준 10[Ω]으로 상정하며, 배터리의 외함 저항 및 PCS의 외함저항은 실측값을 바탕으로 각각 8[Ω], 3.52[Ω]으로 상정한다.

[표 2] ESS 시스템 모델링 조건

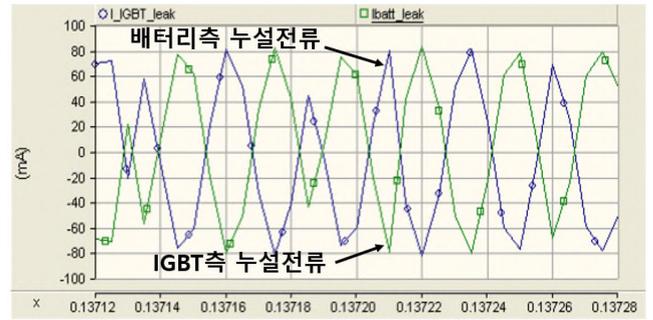
배터리	전압	0.7[kV]
	용량	1[kAh]
	내부 인덕턴스	6[uH]
	내부 저항	152.6[mΩ]
기생 커패시턴스	배터리측+DC전로	22[nF]
	IGBT	0.32[nF]
저항	공통접지	10[Ω]
	배터리 외함	8[Ω]
	PCS 외함	3.52[Ω]

4.2 ESS의 누설전류 특성 분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PCS가 정상 운전할 때, ESS의 누설전류의 RMS 값을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, PCS의 IGBT측의 누설전류와 배터리측의 누설전류의 RMS 값은 동일하게 약 34[mA]로 산정된다. 여기서, 그림 5의 누설전류의 방향을 확인하기 위하여, PCS의 IGBT측과 배터리측 누설전류의 순시파형을 나타내면 그림 6과 같고 두 누설전류의 크기가 동일하고 위상이 반대 방향이므로, IGBT측에서 발생한 누설전류가 배터리 측으로 유입되는 것을 알 수 있었다.

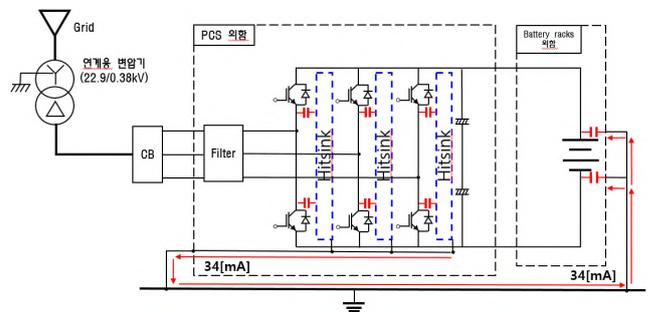


[그림 5] IGBT 스위칭에 의한 누설전류의 RMS 특성



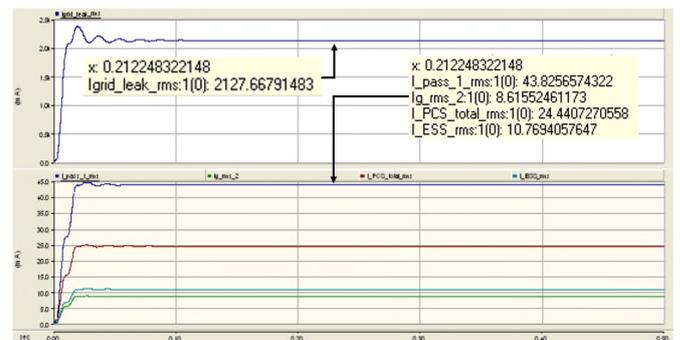
[그림 6] IGBT와 배터리 측 누설전류 특성

또한, IGBT의 스위칭에 의해 발생한 누설전류의 방향은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, IGBT측의 누설전류와 배터리 측의 누설전류의 크기가 동일하고, IGBT측에서 발생한 누설전류가 배터리 측으로 유입되는 것을 알 수 있다.

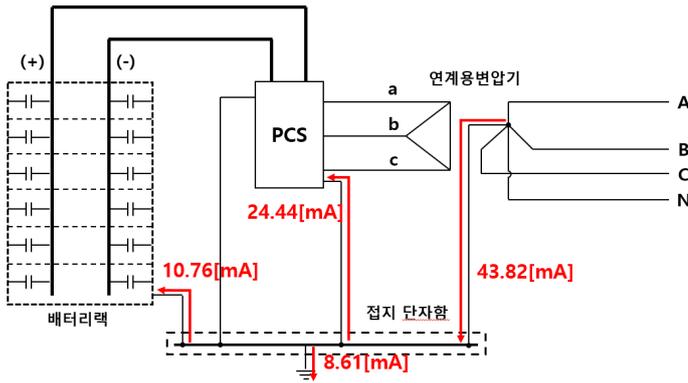


[그림 7] IGBT 스위칭에 의한 누설전류의 방향

한편, PCS가 대기상태일 때, 계통불평형으로 인한 누설전류의 RMS값과 누설전류의 방향을 나타내면 그림 8, 그림 9와 같다. 여기서 그림 8은 계통불평형으로 인해 발생한 누설전류의 RMS 값이며, 그림 9는 누설전류의 흐름을 나타낸다. 계통 불평형으로 인해 발생한 누설전류의 2.13[A] 중 43.83[mA]가 ESS시스템 쪽으로 유입되고, 그 중 8.6[mA]는 공통 접지 저항을 통해 대지로 방전되며 24.4[mA]는 PCS의 외함으로, 10.76[mA]는 ESS의 외함으로 유입된다. 따라서, 누설전류가 흐르는 경우, 배터리에 지속적인 악영향을 미칠 가능성이 있음을 확인하였다.



[그림 8] 계통불평형에 의한 누설전류의 RMS 특성



[그림 9] 계통불평형에 의한 누설전류 방향

5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 누설전류 특성을 분석하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 전체 시스템 모델링과 계통불평형 모델링을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 결과, PCS가 정상운전할 때, IGBT측에서 발생한 누설전류의 크기와 배터리측에서 발생한 누설전류의 크기가 동일함을 확인하였고, 두 누설전류 파형을 확대하여 분석한 결과, IGBT측 누설전류와 배터리측 누설전류의 위상이 반대임을 확인하였고 누설전류가 접지를 통해 흐르지 않음을 알 수 있었다. 또한, 계통불평형에 의해 발생한 누설전류가 ESS의 시스템의 공통 접지를 통해 대지로 모두 흘러가지 않고 ESS와 PCS의 외함으로 일부 유입되는 것을 알 수 있었다. 따라서, IGBT측에서 발생한 누설전류와 계통불평형으로 인해 발생한 누설전류가 배터리 측으로 유입되어 배터리에 에너지측면의 영향을 미칠 가능성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.201824 10105070, No.20191210301940)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2020년 산업전문인 력역량강화사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] 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.

[2] 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,

[3] H. J. Jang, T. S. Song, J. Y. Kim, S. J. Kim, T. H. Jang "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, vol. 3, no. 9, pp.25-49, 2019.9.

[4] TOSHIBA, "Inverter Application Manual Leakage Current"

[5] H. Muhsen, S. Hiller, J. Lutz "Three-phase voltage source inverter using SiC MOSFETs-Design and Optimization", 17th European Conference on Power Electronics and Applications, 2015