

PSCAD/EMTDC를 이용한 전기저장장치의 누설전류 특성 해석에 관한 연구

김지명*, 태동현*, 최성문*, 정민철*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on Characteristics of Leakage Current in Energy Storage System Using PSCAD/EMTDC

Ji-Myung Kim*, Dong-Hyun Tae*, Seong-Moon Choi*, Min-Chul Jung*, Dae-Seok Rho*

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

요약

ESS(Energy Storage System)의 누설전류는 PCS(Power Control System)측 누설전류와 계통불평형 전류로 인한 계통측 누설전류, 절연성능 저하로 인한 기기 자체의 누설전류로 구분되는데, PCS측의 누설전류는 정상 상태 운전시, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 스위칭의 전압 변화량과 IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 발생한다. 또한, 계통불평형 전류에 의한 계통측 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 $Yg-\Delta$ 결선방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS로 유입되고, 기기 자체의 절연성능의 저하에 따른 누설전류는 가설 시 전선피복의 손상이나 장기간 사용 시, 사용 환경에 따른 열열화 등의 이유로 절연성능이 저하됨에 따라 누설전류가 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 방열판 유도공식을 통해 산정한 기생 커패시턴스에 의하여 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제시하고 계통불평형에 의한 계통측의 누설전류 발생 메커니즘과 절연성능의 저하에 의한 기기측 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전 계통부, ESS부 등으로 구성된 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘과 계통불평형에 의한 계통측 누설전류 발생 메커니즘 및 절연 성능 저하에 의한 기기측 누설전류 발생 메커니즘을 모델링하고, 누설전류의 특성을 제시한다.

1. 서 론

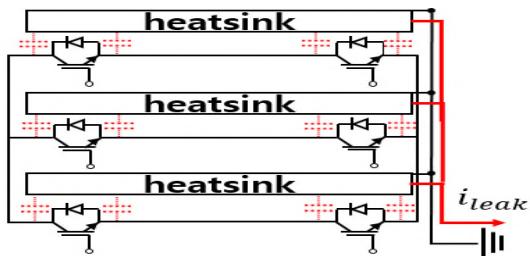
최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS의 설치가 급격하게 증가하고 있다 [1]. 그러나 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있고, 외국에서는 재산피해와 인명피해도 보고되고 있다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 사고원인에 대한 조사를 2차에 걸쳐 시행하여 화재사고에 대한 원인을 제시하였고, 그 중에서 전기적인 위험요인으로 누설전류도 주요 원인 중 하나로 고려되고 있다. ESS의 누설전류는 PCS측 누설전류와 계통불평형 전류로 인한 계통측 누설전류, 절연 성능 저하에 의한 기기 자체의 누설전류로 구분되는데, PCS측의 누설전류는 정상 상태 운전시, IGBT 스위칭의 전압 변화량과 IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 발생한다. 또한, 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 $Yg-\Delta$ 결

선방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS측으로 유입되고, 기기 자체의 절연성능의 저하에 따른 누설전류는 가설 시 전선피복의 손상이나 장기간 사용 시, 사용 환경에 따른 열열화 등의 이유로 절연성능이 저하됨에 따라 누설전류가 존재할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 방열판 유도공식을 통해 산정한 기생 커패시턴스에 의하여 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제시하고 계통불평형에 의한 계통측 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘과 절연성능의 저하에 의한 기기측 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전 계통부, ESS부 등으로 구성된 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘과 계통불평형에 의한 계통측 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘 및 절연 성능 저하에 의한 기기측 누설전류 발생 메커니즘을 모델링하고, 누설전류의 특성을 평가한다.

2. ESS의 누설전류 발생 메커니즘

2.1 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘

PCS측의 IGBT는 전력 변환을 목적으로 2~4[kHz]의 고주파로 스위칭하며, 이로 인한 온도상승을 억제하기 위해 방열판(heatsink)에 설치된다. 하지만, 그림 1과 같이 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여 IGBT의 고주파 스위칭으로 의도치 않은 누설전류가 발생할 수 있다.



[그림 1] 방열판에 의한 기생 커패시턴스로 인한 누설전류

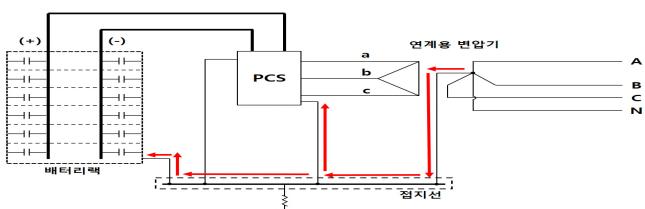
또한, 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류(i_{leak})는 식 (1)과 같이, 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스(C_{stray})에 의해 산정된다. 따라서, 배터리측의 DC전압의 크기와 방열판의 구조에 따라 누설전류의 발생에 큰 영향을 미친다.

$$i_{leak} = C_{stray} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

여기서, i_{leak} : 누설전류, C_{stray} : 기생 커패시턴스, v : PCS 전압, t : 시간

2.2 계통불평형에 의한 계통측 누설전류 발생 메커니즘

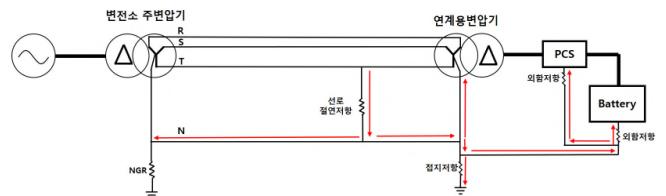
우리나라는 22.9[kV] 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상부하에 의해 부하불평형이 발생하여 중성선에 불평형 전류가 흐르게 된다. 또한, 태양광 전원이 연계된 변압기는 분산전원 연계 기준에 따라 Yg-△ 방식 또는 Yg-Yg 결선방식을 사용하며, 설치 비용의 문제점으로 변압기의 철심도 3각 철심이 대부분 적용되고 있다. 따라서, 변압기 결선방식과 철심구조에 의하여, 부하불평형에 의해 발생하는 중성선 전류는 ESS의 연계용변압기에 유입될 가능성이 있고 이때, 중성선 전류(누설전류)가 공통접지를 통하여 ESS의 접지선으로 유입되는 흐름을 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] 중성선을 통해 유입되는 누설전류의 흐름

2.3 절연성능 저하에 의한 기기측 누설전류 발생 메커니즘

배전선로에서 절연성능 저하에 의한 기기 자체의 누설전류는 그림 3과 같이 선로의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 선로의 절연성능은 가설 시 전선피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의한 감소로 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 전로로 사용되는 전선은 장기간 사용시, 사용 환경에 따라 열열화, 열변형, 오일이나 약품에 의한 열화, 내후성 열화, 저온 환경에서 균열이 생기는 등으로 인하여, 절연 성능이 저하될 수 있다. 한편, 전기설비기술기준에 따라 30[mA] 이하의 정격감도전류에서는 누전차단기가 동작하지 않으므로 항상 누설전류가 존재할 수 있다. 이러한 누설전류는 절연성능이 저하될수록 PCS와 배터리의 외함에 유입될 수 있으므로 안전성에 영향을 미칠 수 있다.



[그림 3] 절연성능 저하에 의한 누설전류의 흐름

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의 누설전류 특성 모델링

3.1 PCS측 누설전류 모델링

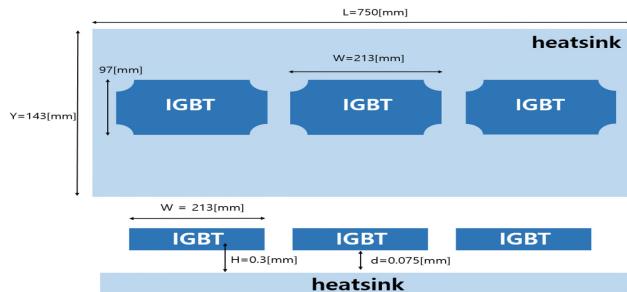
PCS측에서 발생하는 누설전류는 2.1장의 누설전류 발생 메커니즘에 따라 IGBT의 스위칭 전압 변화량과 기생 커패시턴스 등에 의해 산정된다. 이 때, IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스는 방열판의 유도 용량식인 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$C_{stray} = \frac{4 \times \epsilon_r \times \epsilon_0}{\pi} \times w \times \ln\left(\frac{Y}{H}\right) + \frac{A}{d} \times \epsilon_0 + 0.88 \times \epsilon_0 \quad (2)$$

여기서, C_{stray} : 기생 커패시턴스, ϵ_0 : 대기 유전율, ϵ_r : 산화알루미늄의 유전율, w : IGBT 모듈의 폭, Y : 방열판의 세로 길이, H : 방열판에서 IGBT 모듈 중심까지의 거리, A : 방열판의 면적, d : IGBT 모듈 밑면에서 방열판까지의 거리

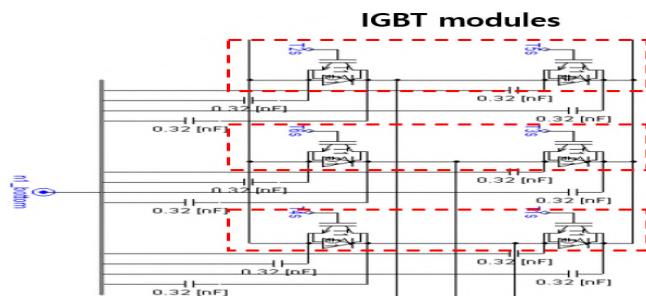
기생 커패시턴스는 IGBT 모듈 및 방열판의 구조에 따라 발생하는데, IGBT 모듈 및 방열판의 구조는 그림 5와 같이 나타

낼 수 있다. 그림 5의 구조를 식 2에 따라 산출한 결과 IGBT 모듈 1개와 방열판 사이에서 존재하는 기생 커패시턴스의 값은 $1.28[nF]$ 으로 산정된다.



[그림 4] IGBT와 방열판 구성도

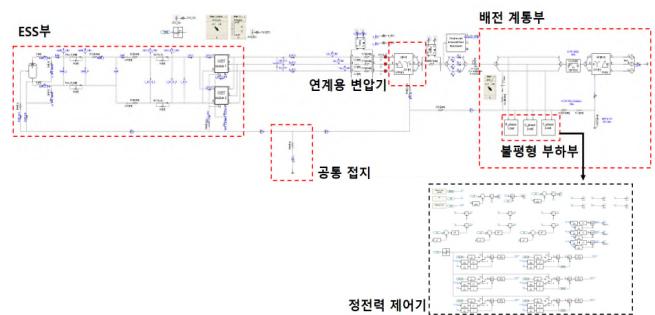
한편, 1개의 IGBT 모듈은 2개의 IGBT 소자로 구성되므로, 기생 커패시턴스는 상기에서 산정된 $1.28[nF]$ 의 기생 커패시턴스에 의하여 2개의 IGBT 소자에 $0.32[nF]$ 씩 4별렬로 구성되며, PSCAD/EMTDC에 의하여 그림 5와 같이 모델링할 수 있다.



[그림 5] IGBT의 기생커패시턴스 모델링

3.2 계통불평형에 의한 계통측 누설전류 발생 모델링

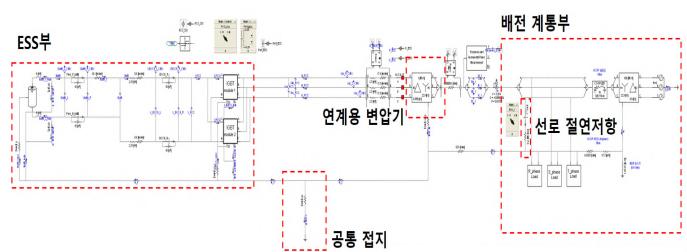
계통불평형에 의한 계통측 누설전류 발생을 모의하기 위하여, 전체 시스템을 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ESS부는 배터리와 DC전로, IGBT 모듈을 이용한 PCS로 구성되며, 배전 계통부는 $Yg-\Delta$ 결선방식의 변전소 주변압기, 배전선로, 보호장치, 불평형 부하부로 구성된다. 또한, 불평형 부하부는 정전력 제어기를 이용하여 정전력부하의 제어를 위하여, 부하의 순시값과 목표로 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종 할 수 있다.



[그림 6] 계통불평형에 의한 누설전류 발생 모델링

3.3 절연성능 저하에 의한 기기측 누설전류 모델링

수용가측 배전선로에서 절연성능 저하에 의한 기기측 누설전류를 모의하기 위하여, 전체시스템을 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 전체 시스템은 배전계통부, 연계용 변압기, 공통 접지, ESS부로 구성된다. 여기서, 선로 절연저항은 전로의 열화 및 접속불량으로 인한 누설전류를 모의한 것이다.



[그림 7] 절연성능 저하에 의한 누설전류 발생 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

누설전류의 특성을 분석하기 위하여, 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, 배터리액은 $0.7[kV]$ 기준으로 $15[kAh]$ 의 용량을 가지며, 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, IGBT측 기생 커패시턴스는 방열판의 유도 용량식을 이용하여 $1.28[nF]$ 로 상정한다[1]. 또한, 배전 계통부의 선로금장은 $15[km]$, 수용가부하는 $4[MVA]$. 불평형율은 $2.5[\%]$, 선로 절연저항은 $0.2[M\Omega]$ 으로 상정한다. 한편, ESS 부의 공통접지 저항은 1종 접지 기준 최대값인 $10[\Omega]$ 으로 상정 하며, 배터리의 외함 저항 및 PCS의 외함저항은 각각 $8[\Omega]$, $3.52[\Omega]$ 으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

배터리	전압[kV]	0.7
	용량[kAh]	15
기생 커패시턴스	배터리측+DC전로[nF]	22
	IGBT[nF]	1.28
배전 계통부	선로공장[km]	15
	수용가부하[MVA]	4
	불평형율[%]	2.5
ESS부	선로 절연저항[MΩ]	0.2
	공통접지[Ω]	10
	배터리 외함[Ω]	8
	PCS 외함[Ω]	3.52

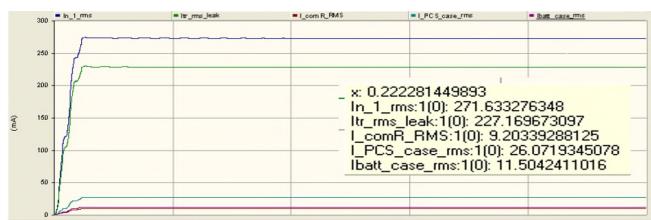
4.2 ESS의 누설전류 특성 분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PCS가 정상 운전할 때, ESS의 누설전류의 RMS 값을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서 그림 8은 1.28[nF]의 기생커패시턴스일 때, 누설전류의 RMS값을 나타낸다. 1.28[nF]의 기생커패시턴스가 발생했을 때, 누설전류의 RMS값은 약 34[mA] 발생함을 알 수 있다.



[그림 8] 기생커패시턴스(1.28[nF])에 의한 누설전류 특성

또한, 계통불평형 전류로 인한 누설전류의 RMS 값을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 계통불평형 전류가 272[mA]인 경우, 227.17[mA]의 중성선 전류는 연계용 변압기로 흐르고 47.87[mA]의 누설전류가 ESS측의 접지선을 타고 흐르며, 그 중에서 9.2[mA]는 10[Ω]의 접지저항을 통하여 대지로 흐르며, 26.07[mA]는 PCS의 외함으로, 11.5[mA]는 배터리의 외함으로 흐르게 된다.



[그림 9] 계통불평형에 의한 누설전류의 RMS 특성

한편, 절연성능 저하로 인한 누설전류의 RMS 값을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, T상의 케이블의 절연 저항이 0.2[MΩ]인 경우, 9.72[mA]의 전류가 ESS측으로 유입되며 그 중 8.13[mA]의 누설전류는 연계용 변압기를 통해 흐르고 1.67[mA]의 누설전류는 ESS측의 접지선을 통해 흐른다. 그 중에서 0.33[mA]는 10[Ω]의 접지저항을 통하여 대지로 흐르며, 0.93[mA]는 PCS의 외함으로, 0.41[mA]는 배터리의 외함으로 흐르게 된다.



[그림 10] 절연성능 저하에 의한 누설전류의 RMS 특성

5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 전기적 위해요인 중의 하나인 누설전류의 특성을 분석하기 위하여, 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC에 의하여 누설전류를 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스의 크기에 따른 누설전류의 특성을 분석한 결과, 기생 커패시턴스의 크기가 1.28[nF]인 경우, PCS측 누설전류의 RMS값은 34[mA]임을 알 수 있었다.

(2) ESS의 공통 접지저항이 10[Ω]일 때, 불평형 부하부가 4[MVA] 용량의 불평형율 2.5[%]인 경우, ESS측 접지선으로 유입되는 누설전류는 총 47.87[mA]이고 접지저항을 통해 9.2[mA], PCS와 ESS의 외함으로 각각 26.07[mA], 11.5[mA]의 누설전류가 유입되는 것을 알 수 있었다.

(3) 선로의 절연성능의 저하에 따라 누전이 생겨 누설전류가 흐르는 경우를 모의하면, T상의 케이블 절연 저항이 0.2[MΩ]일 때, ESS의 접지선을 통해 1.67[mA]의 누설전류가 유입되고 접지저항을 통해 0.33[mA], PCS와 ESS의 외함으로 각각 0.93[mA], 0.41[mA]의 누설전류가 유입되는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 (No.20182410105070)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2020년 산업전문인력역량강화사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

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] 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