

## PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 누설전류 모델링에 관한 연구

김지명<sup>1</sup>, 태동현<sup>1</sup>, 이일무<sup>2</sup>, 임건표<sup>3</sup>, 노대석<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교, <sup>2</sup>전기기술인협회, <sup>3</sup>한전전력연구원

### A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC

Ji-Myung Kim<sup>1</sup>, Dong-Hyun Tae<sup>1</sup>, Il-Moo Lee<sup>2</sup>, Geon-Pyo Lim<sup>3</sup>, Dae-Seok Rho<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Korea University of Technology and Education, <sup>2</sup>KEEA, <sup>3</sup>KEPRI

**요약** ESS의 누설전류는 PCS(Power Control System)측 누설전류와 계통불평형 전류로 인한 누설전류로 구분되는데, PCS측의 누설전류는 정상 상태 운전 시, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 스위칭의 전압 변화량과 IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 발생한다. 또한, 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 Yg- $\Delta$  결선방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS로 유입된다. 따라서, 본 논문에서는 방열판 유도공식을 통해 산정한 기생 커패시턴스에 의하여 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제시하고 또한, 계통불평형에 의한 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리부, PCS부, AC전원부로 이루어진 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘과 배전 계통부, 불평형 부하부, ESS부로 이루어진 계통불평형에 의한 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘을 모델링 하고, 누설전류의 특성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 외함의 저항과 접지저항의 크기에 따라 PCS측의 누설전류는 7[mA]에서 34[mA]로, 계통불평형에 의한 배터리 외함으로 흐르는 누설전류는 3.96[mA]에서 10.76[mA]로 증가하여 배터리측에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

**Abstract** A leakage current of ESS is classified mainly by the occurrence from a PCS(Power Conditioning System) section and an unbalanced grid current. The reason for the leakage current from the PCS section is a voltage change by IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) switching and stray capacitance between the IGBT and heatsink. The leakage current caused by the grid unbalanced current flows to the ESS through the neutral line of grid-connected transformer for the ESS with a three limb iron type of Yg-wire connection. This paper proposes a mechanism for the occurrence of leakage current caused by stray capacitance, which is calculated using the heatsink formula, from the aspect of the PCS section and grid unbalance current. Based on the proposed mechanisms, this study presents the modeling of the leakage current occurrence using PSCAD/EMTDC S/W and evaluates the characteristics of leakage currents from the PCS section and grid unbalanced current. From the simulation result, the leakage current has a large influence on the battery side by confirming that the leakage current from the PCS is increased from 7[mA] to 34[mA], and the leakage current from an unbalanced load to battery housing is increased from 3.96[mA] to 10.76[mA] according to the resistance of the housings and the magnitude of the ground resistance.

**Keywords** : Leakage Current, Stray Capacitance, PCS, Unbalance Grid, PSCAD/EMTDC

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090, No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received October 16, 2020

Revised November 11, 2020

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

## 1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS의 설치가 급격하게 증가하고 있다[1-3]. 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 위해요인으로 누설전류도 주요 원인 중 하나로 고려되고 있다[4,5].

ESS의 누설전류는 PCS측 누설전류와 계통불평형 전류로 인한 누설전류로 구분되는데, PCS측의 누설전류는 정상 상태 운전 시, IGBT 스위칭의 전압 변화량과 IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 발생한다[6,7]. 또한, 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 Yg-Δ 결선 방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS측으로 유입된다[8-10]. 따라서, 본 논문에서는 방열판 유도공식을 통해 산정한 기생 커패시턴스에 의하여 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제시하고 또한, 계통불평형에 의한 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 누설전류의 발생 메커니즘을 모델링하고, PCS측 누설전류의 특성과 계통불평형 전류에 의한 누설전류의 특성을 평가한다.

상기의 모델링을 바탕으로 파라미터 분석에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 정상 상태 운전 시 IGBT측 기생 커패시턴스에 따라 누설전류가 좌우됨을 확인할 수 있었고 누설전류의 순시파형을 분석한 결과, IGBT측에서 발생한 누설전류가 배터리측으로 유입될 가능성이 있음을 알 수 있었다. 또한, 계통불평형 전류로 인해 발생하는 누설전류는 PCS 스위칭에 발생하는 누설전류보다 훨씬 큰 값을 가짐을 알 수 있었고, 외함의 저항과 접지 저항의 크기에 따라 배터리측으로 흐르는 누설전류의 크기가 좌우되어 배터리측에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

## 2. ESS의 누설전류 발생 메커니즘

### 2.1 PCS측의 누설전류 발생 메커니즘

일반적으로, 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 목적으로 설치되는 ESS의 구성은 Fig. 1과 같이 AC전원부(연계용 변압기, 보호 장치), PCS부(필터, PCS 변압기, IGBT, DC 커패시터), 배터리부(배터리, 보호 장치) 등으로 구성된다.

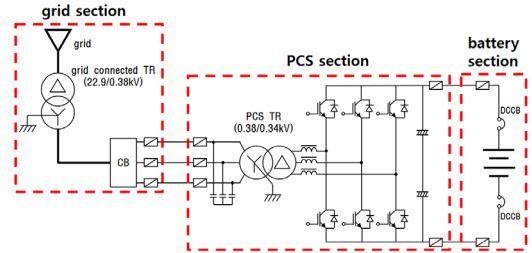


Fig. 1. Configuration of ESS

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

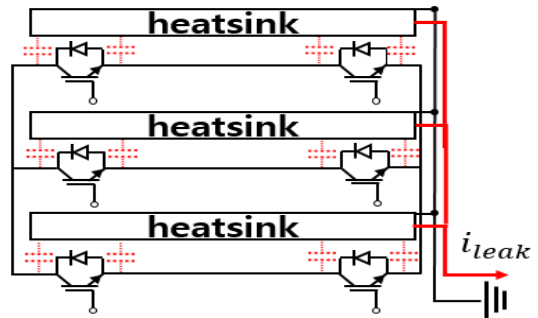


Fig. 2. Leakage current caused by stray capacitance of heatsink

또한, 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류( $i_{leak}$ )는 Eq. (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 누설전류 발생 메커니즘

우리나라는 22.9[kV] 공통 중성선 다중접지 3상 4선 식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 단상부하에 의해 부하불평형이 발생하여 중성선에 불평형 전류가 흐르게 된다. 또한, 특고압을 수전 받는 수용가용 주변압기는 대부분  $\Delta$ - $Y_g$  또는  $\Delta$ - $\Delta$  결선방식이 채용되고 있지만, 태양광 전원이 연계된 변압기의 경우, 분산전원 연계 기준에 따라  $Y_g$ - $\Delta$  방식 또는  $Y_g$ - $Y_g$  결선방식을 사용하고 있다. 한편, 설치비용의 문제점으로 변압기의 철심도 5각 철심이 아닌 3각 철심이 대부분 적용되고 있다. 따라서, 변압기 결선방식과 철심구조에 의하여, 부하불평형에 의해 발생하는 중성선 전류( $I_{n1}$ )는 Fig. 3과 같이, ESS의 연계용변압기( $I_{n3}$ )에 유입될 가능성이 있다.

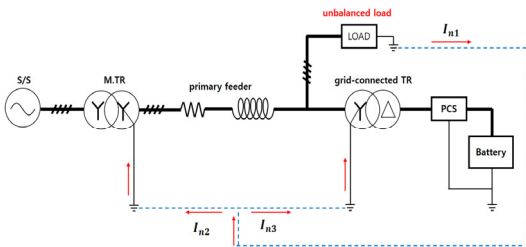


Fig. 3. Concept of neutral current caused by unbalanced grid

한편, ESS는 배터리 랙 및 PCS의 외함과 연계용 변압기의 중성선을 공통으로 접지하여 운용되기 때문에, 계통에서 발생한 불평형 전류(누설전류)가 공통접지를 통하여 ESS의 접지선으로 유입되는 흐름을 나타내면 Fig. 4와 같다. 이때, 전기설비기준에 제시된 기준에 따라 설치된 접지저항의 크기에 따라, 불평형 전류는 대지로 모두

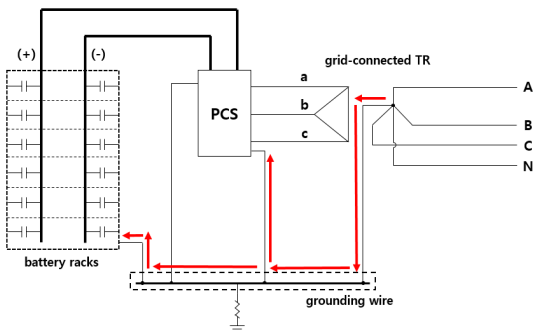


Fig. 4. Flow of leakage current through common grounding wire

흘러 들어가지 않고 PCS와 배터리의 외함으로 유입될 가능성이 있다. 즉, 외함의 저항 및 접지저항의 크기에 따라, 외함으로 흘러 들어가는 누설전류의 크기가 좌우됨을 알 수 있다.

## 3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의

### 누설전류 특성 모델링

#### 3.1 PCS측 누설전류 모델링

##### 3.1.1 기생 커패시턴스에 의한 누설전류 모델링

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

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

여기서,  $C_{stray}$ : 기생 커패시턴스,  $\epsilon_0$ : 대기 유전율,  $\epsilon_r$ : 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, Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 예를 들어, 하나의 방열판에 3개의 IGBT 모듈이 배치되는 경우, IGBT 모듈 1개의 크기는 가로 213[mm], 세로 97[mm] 이고, 방열판의 크기는 가로 750[mm], 세로 143[mm] 이며, IGBT 모듈 중심부에서 방열판까지의 거리는 0.3[mm]로 상정한다. 또한, IGBT 모듈 밑면에서 방열판까지의 거리는 0.075[mm]이고, IGBT 기판의 소재는 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )이며 유전율( $\epsilon_r$ )은 9.8로 상정한다. 상기의 값을 바탕으로, Eq. (2)에 따라 IGBT 모듈 1개와 방열판 사이에서 존재하는 기생 커패시턴스의 값은 1.28[nF]으로 산정된다.

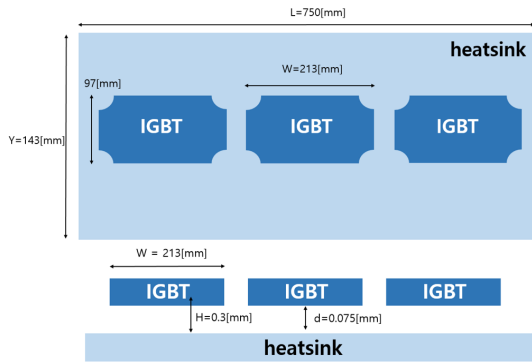


Fig. 5. Configuration of IGBT and heatsink

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 4병렬로 구성되며, PSCAD/EMTDC에 의하여 Fig. 6과 같이 모델링할 수 있다.

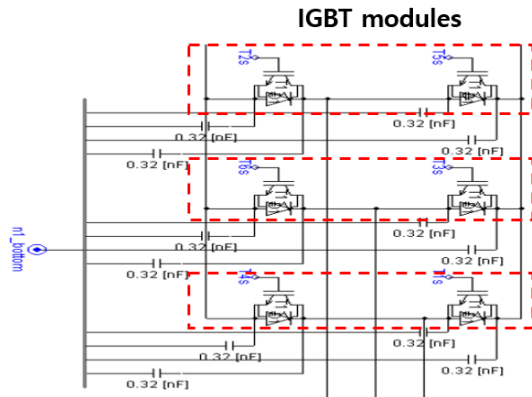


Fig. 6. Modeling of stray capacitance at IGBT modules

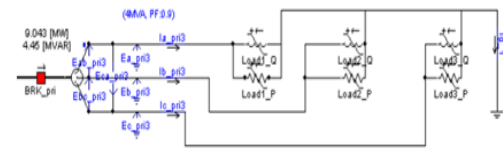
### 3.1.2 전체 시스템 모델링

PCS측 누설전류의 특성을 분석하기 위하여, AC전원부, PCS부, 배터리부(DC전로)로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, AC전원부는 Yg-△ 결선방식의 연계용 변압기, 보호장치로 구성되며, PCS부는 IGBT 모듈, △-Yg 결선방식의 PCS용 내부 변압기, LCL필터 등으로 구성된다. 또한, 배터리부는 배터리 랙과 DC전로로 구성되고, 배터리 랙은 배터리와 퓨즈로 이루어지며, DC전로는 DC차단기와 전로로 구성된다. 한편, PCS부는 배터리부의 DC전압과 AC전원부의 AC전압을 전력변환 소자를 통해 양방향으로 변환하는 역할을 수행한다.

## 3.2 계통불평형에 의한 누설전류 발생 모델링

### 3.2.1 부하불평형 모델링

고압선로에서 3상 부하와 불평형 조건을 모의하기 위하여 수용가부하를 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 8(a)는 불평형부하부의 모델링을 나타내고, Fig. 8(b)는 정전력 제어를 나타내며, 정전력부하의 제어를 위하여, 부하의 순시값과 목표로 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종할 수 있다.



(a) modeling of unbalanced load section

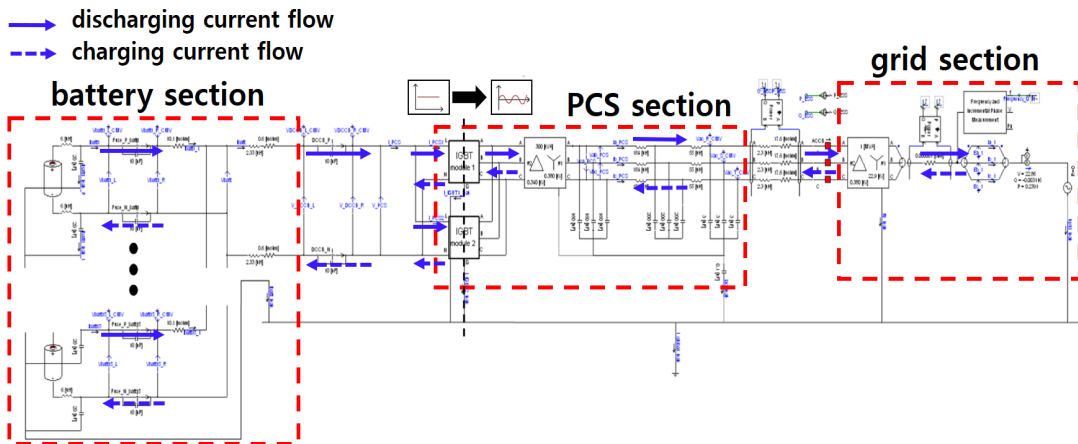


Fig. 7. Modeling of entire system

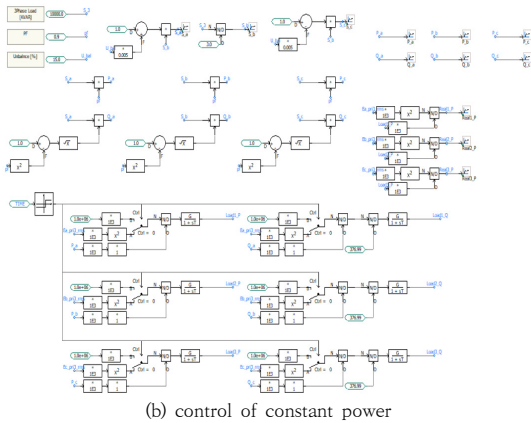


Fig. 8. Modeling of unbalanced load

3.2.2 전체 시스템 모델링

배전용 변전소와 고압선로로 구성된 배전 계통부와 불평형 부하부, ESS부로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전 계통부는 Yg-Yg- $\Delta$  결선방식의 3권선 주변압기와 배전선로 (ACSR 160[mm<sup>2</sup>])로 구성하며, 불평형 부하부는 3상 정전력 부하와 불평형 부하 제어장치로 구성된다. 또한, ESS부는 Yg- $\Delta$  결선방식의 연계용 변압기의 중성선과 ESS와 배터리의 외함 접지선으로 구성된다.

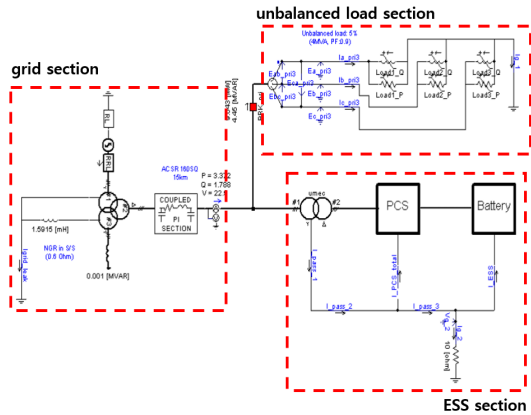


Fig. 9. Modeling of entire system

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

PCS 정상운전 시, IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 특성을 분석하기 위

하여, Table 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배터리 시스템은 0.7[kV], 1[kAh]의 배터리 랙을 15개 병렬로 연결하여 1.05[MWh]의 용량을 가지며, 각 배터리 랙의 내부 인덕턴스 및 내부 저항은 제조사의 값을 바탕으로 각각 6[uH], 152.6[m $\Omega$ ]으로 상정한다. 또한, 배터리 및 DC 전로의 기생 커패시턴스는 선로 커패시턴스 유도식을 통해 4선의 30[m] 병렬선로에 대하여 22[nF]가 산정되며, IGBT의 기생 커패시턴스는 3.1.1절에서 제시한 1.28[nF]를 상정하고 이상적인 값으로 0.5[nF]를 고려한다[11].

Table 1. Simulation conditions of leakage current at PCS section

	item	contents
battery rack	voltage[kV]	0.7
	capacity[kAh]	1
	internal inductance[uH]	6
	internal resistance[m $\Omega$ ]	152.6
stray capacitance	battery & DC line[nF]	22
	IGBT[nF]	0.5, 1.28

한편, 계통불평형 전류에 의해 발생하는 누설전류의 특성을 분석하기 위하여, Table 2와 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전계통은 고압 선로 공장을 15[km], 수용가 부하를 4[MVA], 역률을 0.9로 상정하고, 계통불평형은 5[%]의 부하 불평형율을 고려한다. 공통접지 저항은 1중 접지 기준의 최대값인 10[ $\Omega$ ]을 기준으로 1[ $\Omega$ ]까지 상정하며, 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 8[ $\Omega$ ], 3.52[ $\Omega$ ]을 상정한다.

Table 2. Simulation conditions of leakage current caused by unbalanced load

	item	contents
grid section	line length[km]	15
	customer load[MVA]	4
	unbalanced rate[%]	5
ESS section	grounding resistance[ $\Omega$ ]	1, 10
	resistance of battery case[ $\Omega$ ]	8
	resistance of PCS case[ $\Omega$ ]	3.52

4.2 PCS측의 누설전류 특성 분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PCS가 충전 운전하는 경우, IGBT와 방열판 사이에 0.5[nF]의 기생 커패시턴스에 대하여, 공통접지로 유입되는 누설전류의

RMS값을 구하면 Fig. 10과 같다. 여기서, Fig. 10(a)는 PCS 충전 시, PCS의 전력과 전압을 나타내고, Fig. 10(b)는 기생 커패시턴스에 의해 발생하는 누설전류의 RMS값을 나타낸다. 이때, PCS의 외함에서 접지선을 타고 흐르는 누설전류의 RMS 값은 약 7[mA]가 산정되어 전기설비기술기준(1[mA])의 허용치를 상회함을 알 수 있다.

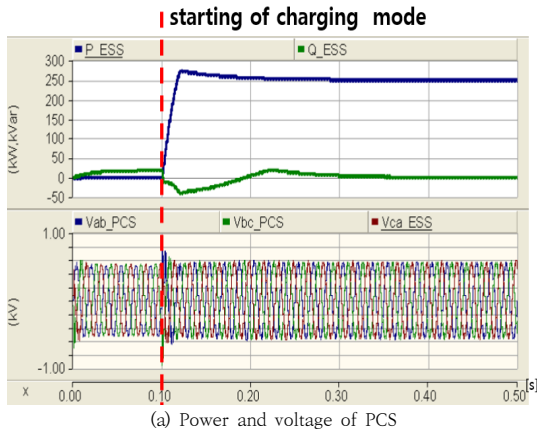


Fig. 10. Characteristics of leakage current by stray capacitance (0.5nF) at charging mode

또한, PCS가 방전 운전하는 경우, IGBT와 방열판 사이에 0.5[nF]의 기생 커패시턴스에 대하여, 공통접지로 유입되는 누설전류의 RMS값을 구하면 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11(a)는 PCS 방전 시, PCS의 전력과 전압을 나타내며, Fig. 11(b)는 기생 커패시턴스에 의해 발생하는 누설전류의 RMS값을 나타낸다. 이때, PCS의 외함에서 접지선을 타고 흐르는 누설전류의 RMS 값은 약 7[mA]가 산정되어, PCS 충전 시와 유사한 누설전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

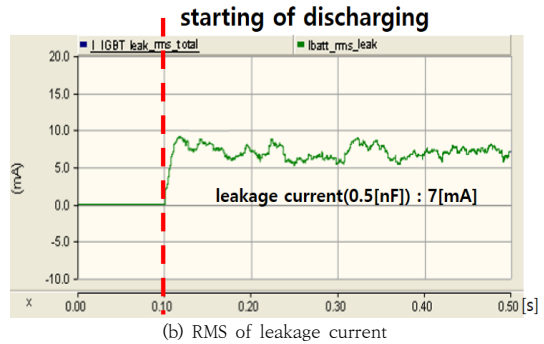
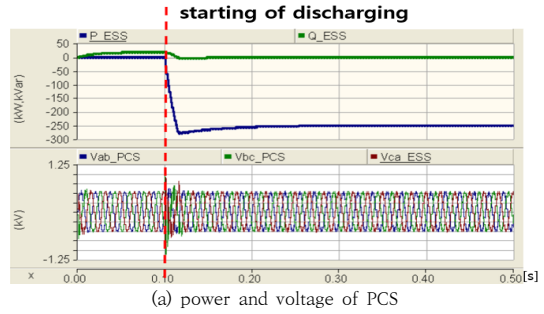


Fig. 11. Characteristics of leakage current by stray capacitance (0.5nF) at discharging mode

한편, IGBT와 방열판 사이의 기생 커패시턴스가 1.28[nF]인 경우, 공통접지로 유입되는 누설전류의 RMS 값을 구하면 Fig. 12와 같다. 여기서, PCS의 외함에서 접지선을 타고 흐르는 누설전류의 RMS 값은 약 34[mA]로 산정되어 기준치를 크게 초과함을 알 수 있다. 즉, IGBT와 방열판 사이의 기생 커패시턴스가 0.5[nF]에서 1.28[nF]으로 증가함에 따라, 누설전류의 크기도 7[mA]에서 34[mA]로 증가함을 알 수 있다. 이때, Fig. 13은 IGBT측과 배터리측의 누설전류의 순시파형을 나타내며, 각각의 누설전류의 크기가 동일하고 위상이 반대 방향임을 알 수 있다.

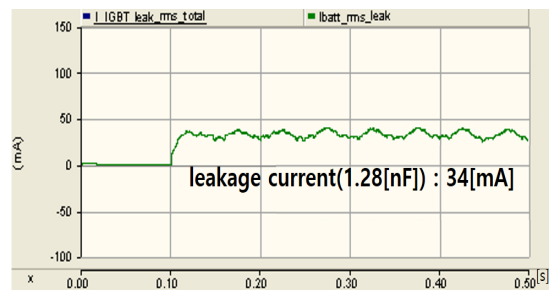


Fig. 12. Characteristics of leakage current by stray capacitance(1.28nF)

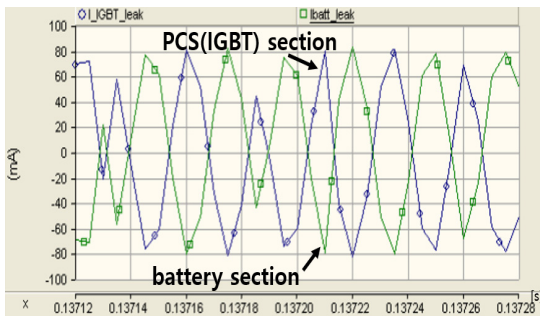


Fig. 13. Characteristics of leakage current at PCS(IGBT) and battery section

한편, IGBT와 방열판 사이의 기생 커패시턴스에 의하여 발생한 누설전류의 방향은 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, IGBT측과 배터리 측의 누설전류는 크기가 동일하고 방향이 반대임을 알 수 있다. 즉, IGBT측에서 발생한 누설전류가 접지상태(접지저항)에 따라 배터리 측으로 유입될 가능성이 있음을 알 수 있고, IGBT측 기생 커패시턴스가 증가함에 따라 누설전류도 증가하여, 배터리에 악영향을 끼칠 가능성을 확인할 수 있었다.

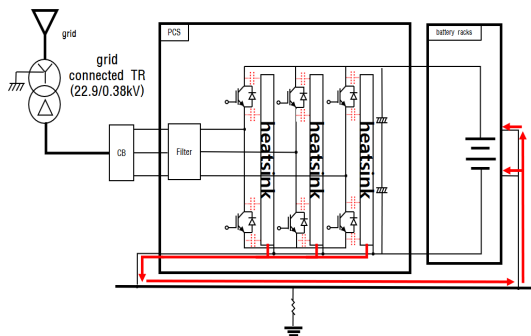
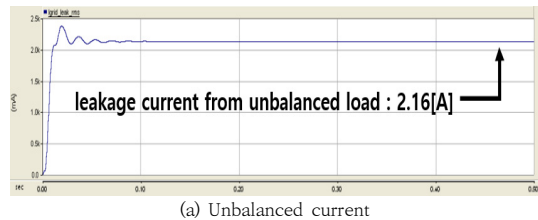


Fig. 14. Leakage current flow caused by IGBT switching

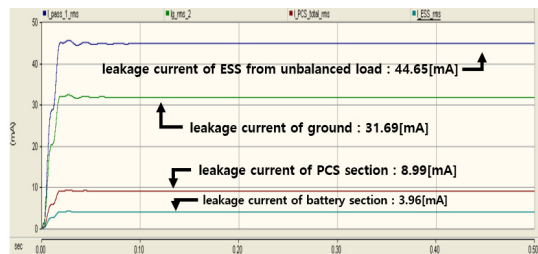
### 4.3 계통불평형 전류에 의한 누설전류 특성 분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 계통불평형 전류로 인한 누설전류의 RMS값을 구하면 Fig. 15와 같다. 여기서 Fig. 15(a)는 계통불평형 전류로 인해 발생한 전체 누설전류의 RMS값을 나타내며, Fig. 15(b)와 Fig. 15(c)는 접지저항이 각각 1[Ω], 10[Ω]인 경우, ESS측으로 유입되는 누설전류의 RMS값을 나타낸다. 계통불평형 전류가 2.16[A]인 경우, 44.65[mA]의 누설전류가 ESS측의 접지선을 타고 흐르며, 그 중에서 31.69[mA]는 1[Ω]의 접지저항을 통하여 대지로 흐르며, 8.99[mA]는 PCS의 외함으로, 3.96[mA]는 배터리의 외함으로 흐르게 된다.

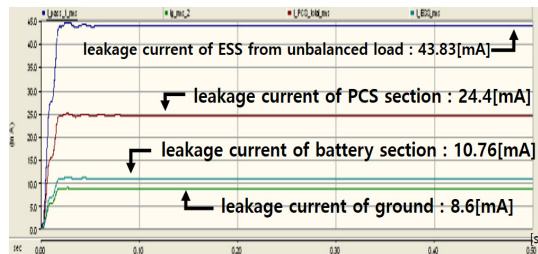
또한, 접지저항이 10[Ω]인 경우, 43.83[mA]의 누설전류에서 8.6[mA]는 접지저항을 통해 대지로 흐르며, 24.4[mA]는 PCS의 외함으로, 10.76[mA]는 배터리의 외함으로 유입된다.



(a) Unbalanced current



(b) Total leakage current of ESS(grounding resistance : 1[Ω])



(c) Total leakage current of ESS(grounding resistance : 10[Ω])

Fig. 15. Characteristics of leakage current caused by unbalanced load

따라서, 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 PCS 스위칭에 의해 발생하는 누설전류보다 훨씬 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있고, 또한 접지저항의 값이 증가함에 따라 누설전류는 접지저항을 통해 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 배터리와 PCS의 외함으로 유입될 수 있음을 확인하였다. 즉, 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 Fig. 16과 같이 배터리와 PCS의 외함으로 유입되고, 접지저항이 클수록 유입되는 누설전류의 크기가 증가하여 배터리에 지속적인 악영향을 미칠 가능성이 있음을 확인하였다.

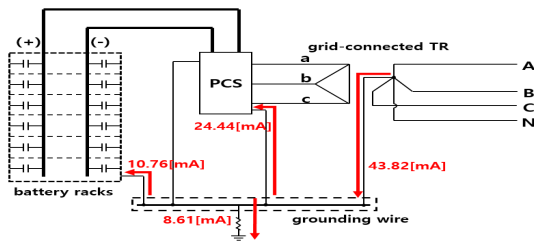


Fig. 16. Direction of leakage current caused by unbalanced load

## 5. 결론

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

- (1) IGBT와 방열판 사이의 기생 커패시턴스에 의하여 발생하는 누설전류의 특성을 분석한 결과, PCS의 충전 운전과 방전 운전에 대하여 거의 동일한 값을 가짐을 알 수 있었다.
- (2) IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스의 크기에 따른 누설전류의 특성을 분석한 결과, 기생 커패시턴스의 크기가 0.5[nF]에서 1.28[nF]으로 증가함에 따라, PCS측 누설전류의 RMS값도 7[mA]에서 34[mA]로 증가함을 알 수 있었다.
- (3) IGBT측과 배터리측의 누설전류의 방향을 확인하기 위하여, 순시파형을 분석한 결과, IGBT측과 배터리측의 누설전류 순시파형 위상이 반대임을 알 수 있어 IGBT측에서 발생한 누설전류가 배터리측으로 유입될 가능성이 있음을 알 수 있었다.
- (4) 계통불평형 전류에 의한 누설전류는 PCS 스위칭에 의해 발생하는 누설전류보다 훨씬 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있고, 또한 접지저항의 값이 증가함에 따라 누설전류는 접지저항을 통해 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 배터리와 PCS의 외함으로 유입될 수 있음을 확인하였다.

향후에는 전기저장장치의 전기적인 위해요인이 될 수 있는 누설전류를 저감하기 위하여, IGBT와 방열판 사이의 기생 커패시턴스를 감소시킬 수 있는 설계기법이 요구되며, 적절한 접지저항의 관리나 증성점 접지저항기

(NGR)를 설치하여 계통측의 불평형에 의한 누설전류를 저감시킬 수 있는 방안이 마련되어야 한다.

## References

- [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] S. Y. Lim, S. Y. Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector", Journal of Energy Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.4.031>
- [3] 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.
- [4] 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. DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>
- [5] 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. DOI: <http://doi.org/10.34139/JSCS.2019.9.3.25>
- [6] TOSHIBA, "Inverter Application Manual Leakage Current"
- [7] 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
- [8] G.Morkyani, M.-R.Haghifam, "Analysis of ferroresonance in a 20kV distribution network", International conference on power electronics and intelligent transportation system, pp. 31-35, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEITS.2009.5407008>
- [9] Madhab Roy, Chinmay Kanti Roy, "A study on ferroresonance and its dependence on instant of switching angle of the source voltage", Third international conference on power systems, Kharagpur, pp. 1-6, India December 27-29, 2009 DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442704>
- [10] Paul S. Moses, Mohammad A.S.Masoum, Hamid A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers", IEEE Transactions on energy conversion, vol.26, no.2, pp. 581-592, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2088400>
- [11] TOSHIBA, "EMC Design of IGBT Module"



김 지 명(Ji-Myung Kim)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

임 건 표(Geon-Pyo Lim)

[정회원]



- 2013년 8월 : 충남대학교 전기공학과(공학박사)
- 1998년 1월 ~ 2007년 9월 : 한국전력공사 보령화력본부 차장
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

<관심분야>

에너지저장장치, 화력발전, 전력계통, 신재생에너지

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[중신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

이 일 무(II-Moo Lee)

[중신회원]



- 2007년 2월: 홍익대학교 전기공학과 (학사, 석사 공학박사)
- 1999년 12월~ 2004년 7월 : ㈜ 피에스디테크 연구팀장
- 2004년 8월~ 2011년 1월 : 홍익대학교 전기공학부 겸임교수
- 2004년 8월 ~ 2011년 1월 : 마이크로파워 대표이사
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 슈나이더일렉트릭 PQ Expert
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국전기기술인협회 연구팀장

<관심분야>

전기품질해석, 분산전원연계, 전기안전