

# 대용량 ESS의 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연저항 특성에 관한 연구

김기영\*, 박재범\*, 최성식\*, 김미성\*, 김승호\*\*, 노대석\*\*\*  
\*한국화학융합시험연구원, \*\*세방전기, \*\*\*한국기술교육대학교,  
e-mail:g2rky@ktr.or.kr

## Characteristics of Insulation Resistance According to Battery Stray-capacitance in Large Scale ESS

Ki-Young Kim\*, Jae-Bum Park\*, Sung-Sik Choi\*, Mi-Sung Kim\*, Hyun-Sik Kim\*\*, Dae-Seok Rho\*\*\*

\*Korea Testing and Research Institute.

\*\*Global Electricity Co., Ltd.

\*\*\*Dept. of Electric Engineering, Korea University of Technology and Education.

### 요 약

최근, 대용량 ESS의 화재사고가 지속되어 이를 방지하기 위하여, 지락사고를 감지하기 위한 절연저항 감시장치(IMD : insulation monitoring device)의 설치를 의무화하고 있다. 그러나 태양광 연계용 ESS의 경우, 절연저항 값이 배터리 기생커패시턴스와 같은 운용환경에 따라 급격히 변동하는 현상으로 인하여, IMD가 오동작하는 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 배터리의 기생커패시턴스가 절연저항에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 태양광 연계용 ESS의 시스템 구성과 실 계통 운용사례를 분석한다. 또한, 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연저항의 특성을 분석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전계통부, ESS부, 절연저항 감시장치부, 배터리 기생커패시턴스부로 구성된 대용량 ESS 단지의 모델링을 제시한다. 이 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 기생커패시턴스의 값을 0[ $\mu$ F]에서 0.45[ $\mu$ F]까지 증가시키는 경우, 약 20[M $\Omega$ ] 정도를 유지하던 절연저항 값이 2.5[M $\Omega$ ] 이하까지 저하됨을 알 수 있었다. 따라서, 배터리의 기생커패시턴스가 증가하는 경우, 배터리의 절연에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

## 1. 서 론

최근, 태양광의 경우 재생에너지 3020정책에 따라 수십에서 수백 메가와트 규모로 도입되고 있으며, 이에 따라 연계되는 ESS의 용량도 함께 급증하고 있는 실정이다. 그러나 국내 및 해외에서 운용중인 다수의 리튬이온 기반 ESS에서 화재가 빈번히 발생하여, 이에 대한 대책으로 다양한 보호기들이 ESS에 적용되고 있다. 특히, IMD는 비접지 직류계통으로 운용되고 있는 ESS의 특성에 적합하여, ESS의 절연저항을 실시간으로 감시하고, 지락과 같은 사고를 감지하기 위하여 필수적으로 설치되고 있다. 그러나 실 계통에서 운용중인 다수의 IMD는 기존의 보호기기와는 달리 명확한 정정기준이 없고, 특히 대용량 ESS에서는 배터리 기생커패시턴스와 같은 운용환경에 따라 그 값이 급격히 변동하는 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 ESS를 안정적으로 운용하기 위하여, 대용량 ESS단지의 시스템 구성과 실 계

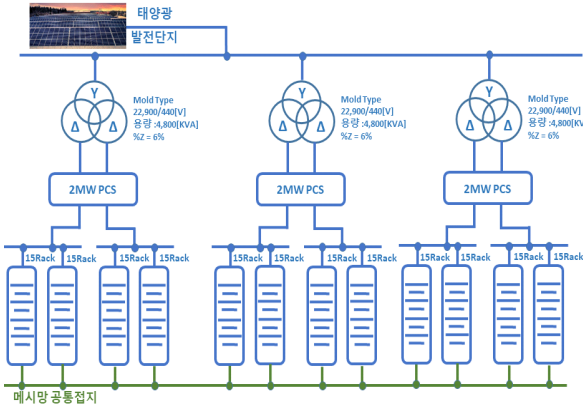
통 운용사례를 분석한다. 또한, 기생커패시턴스 증가에 따른 누설전류의 영향을 분석하기 위하여, H/W 시험장치를 이용한 특성시험을 분석한다. 한편, 전력계통 상용해석 S/W 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 기생커패시턴스에 따른 절연저항 변동특성을 모델링하고, 시뮬레이션 분석을 수행한다. 이를 바탕으로, 태양광연계용 ESS의 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연변동특성을 분석하고, 향후, ESS와 IMD의 적절한 운용기준을 마련한다.

## 2. 대용량 ESS의 배터리 기생커패시턴스에 의한 절연저항 사례분석

### 2.1 배터리 용량에 따른 기생커패시턴스 특성

현재, 국내에서 운용중인 태양광연계용 대용량 ESS는 그림 1과 같이 수 메가와트 용량의 전력변환장치 측에 다수의 배터리 랙이 연계되는 방식으로 구성되어 있으며, 배터리 측의 외함접지는 메시망 공통접지를 통하여 병렬로 접속되어

있음을 확인할 수 있다. 또한, ESS용 배터리시스템의 모듈, 랙 단위 기생커패시턴스를 측정한 값은 표 1과 같다. 즉, 배터리의 용량이 크고, 사용빈도가 많을수록 정전용량의 값이 크게 나타남을 확인할 수 있다.



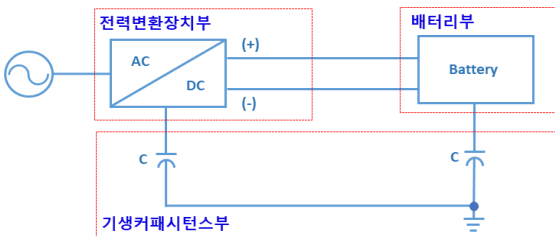
[그림 1] 태양광연계용 대용량 ESS의 계통도

[표 1] ESS용 배터리시스템의 기생커패시턴스 측정결과

제조사	배터리구분	용량[kWh]	C용량[nF]
A	모듈(신품)	7.61	2.46
A	모듈(사용중)	7.61	3.34
B	모듈(사용중)	9.79	2.44
B	랙(사용중)	137	34.1
C	랙(사용중)	30	7.73

## 2.2 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연저항 특성

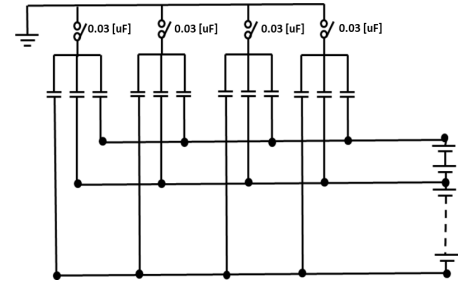
대용량 ESS의 계통구성에 따라 기생커패시턴스가 증가할 경우 특성을 분석하기 위하여, 전력변환장치부와 배터리부 그리고 기생커패시턴스부로 구성된 전체 시스템은 그림 2와 같이 구성한다. 특히, 기생커패시턴스부의 경우, 커패시턴스의 용량에 따른 변화특성을 분석하기 위하여, 커패시턴스를 0.03[uF]씩 병렬로 투입할 수 있도록 그림 2와 같이 구성된다.



[그림 2] 기생커패시턴스 특성시험장치 구성도

ESS가 충전을 수행하는 경우, 전력변환장치와 배터리가 그림 3과 같이 연계된 직류전로에 기생커패시턴스를 증가시키며, 누설전류의 변화를 측정하는 특성시험을 수행한다. 여기서, 누설전류 값은 RCD(Residual Current Detector)를 이용하

여, 그림 4와 같이 측정하였으며, 각 조건에 따른 누설전류 값은 표 2와 같다.



[그림 3] 기생커패시턴스 변환장치



[그림 4] RDC를 이용한 누설전류 측정

[표 2] 대용량 ESS 직류전로의 누설전류

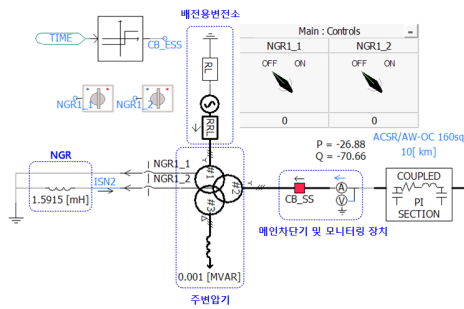
기생커패시턴스 투입량[uF]	누설전류[mA]
0	9
0.03	13
0.06	41
0.09	66
0.12	90

한편, 배터리기생커패시턴스 특성시험결과를 분석하면, 투입된 기생커패시턴스의 값이 0[uF] 일 때, 누설전류 값이 9[mA] 인데 반해, 0.03[uF]의 기생커패시턴스를 투입할 경우 그 값이 13[mA]로 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 투입 기생커패시턴스 값을 0.12[uF]까지 증가시킬 경우, 누설전류 값이 90[mA] 까지 증가하여, 투입하지 않았을 때 보다 약 10배 정도 누설전류 값이 증가함을 알 수 있다. 이를 통해, 태양광 연계용 대용량 ESS의 시스템구성과 운용환경에 따라 배터리 기생커패시턴스가 증가할 경우, 누설전류가 급격히 증가하며, 누설전류가 발생함에 따라 배터리가 연계된 직류전로의 절연저항 값도 저하될 수 있음을 알 수 있다.

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 배터리의 절연저항 모델링

#### 3.1 배전용변전소부

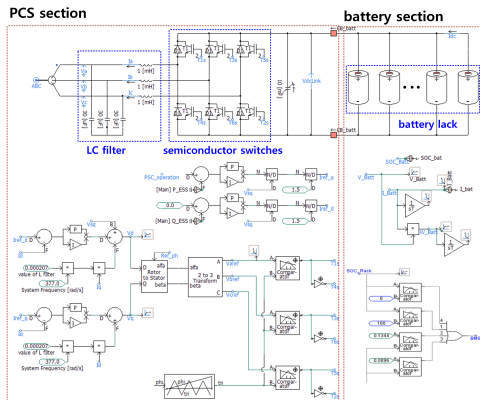
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- $\Delta$  결선방식이며, 3차 권선은 제 3 고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[ $\Omega$ ]의 NGR(neutral grounding reactor)이 설치되는 것으로 상정한다.



[그림 5] 배전용변전소 모델링

#### 3.2 ESS부

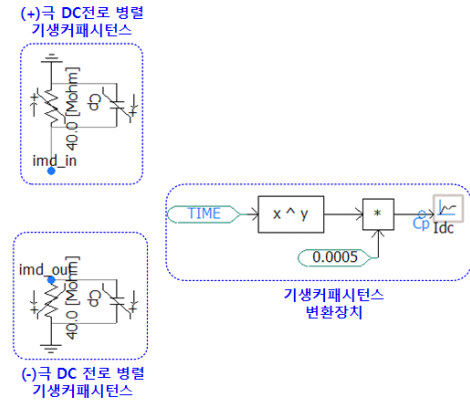
ESS는 그림 6과 같이 배터리부와 PCS부로 구성된다. 여기서, 배터리부는 용량에 따라 수대~수십대의 랙으로 구성되며, 랙 BMS를 포함하여 배터리를 보호하고 안전하게 운용한다. 구체적으로, 랙 BMS는 배터리 모듈 및 랙의 전압과 전류, 온도 등을 계측하고, 이 정보들을 바탕으로 비정상적인 상태(과전압, 과전류, 고온 등)가 발생할 경우, 랙에 설치된 차단기를 제어하여 안전하게 회로를 신속하게 차단하는 기능을 수행한다. 한편, PCS부는 6개의 반도체 스위치와 L-C필터, 전력 제어기로 구성되며, 비례적분(PI: proportional integral)제어 알고리즘을 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어를 수행한다.



[그림 6] ESS부 모델링

#### 3.3 기생커패시턴스부

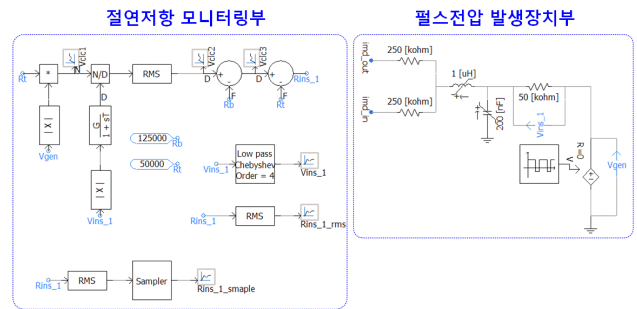
기생커패시턴스부는 그림 7과 같이 (+) 및 (-)극의 DC전로 병렬 커패시턴스와 기생커패시턴스 변환장치로 구성된다. 여기서, 기생커패시턴스는 DC전로의 (+)극과 (-)극에 절연저항과 함께 각각 병렬로 연결되고, 기생커패시턴스 값은 식(1)에 의하여 시간에 따라 증가한다.



[그림 7] 기생커패시턴스부 모델링

#### 3.4 절연저항 감시장치부

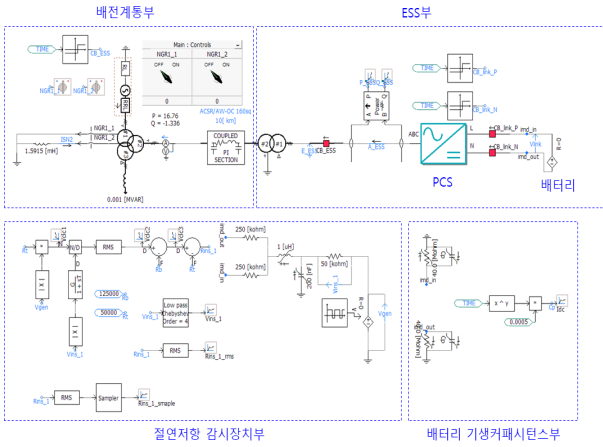
절연저항 감시장치부는 그림 8과 같이 절연저항 모니터링부와 펄스전압 발생장치부로 구성된다. 여기서, 펄스전압 발생장치부는 50V의 크기를 갖고, 듀티 사이클이 50%며, 대칭으로 양극과 음극의 펄스를 발생시킨다. 또한, 절연저항 모니터링부는 식(2)와 같이 절연저항계측용 저항에 인가된 펄스전압을 이용하여, 절연저항 값을 산정한다.



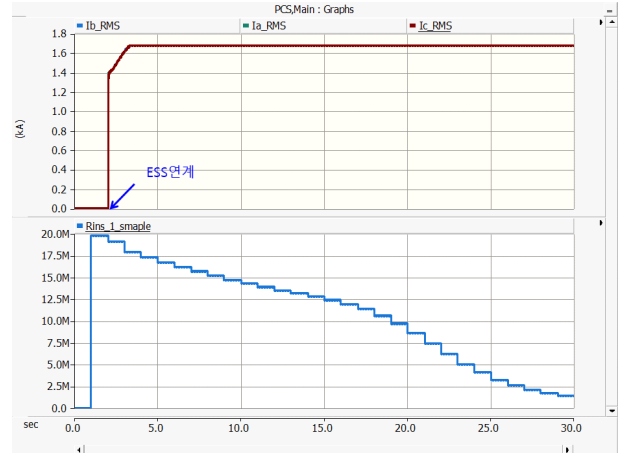
[그림 8] 절연저항 감시장치부 모델링

#### 3.5 전체 시스템

전체 시스템은 그림 9와 같이 배전계통부와 ESS부, 절연저항감시장치부, 배터리 기생커패시턴스부로 구성된다. 여기서, 배전계통부는 메인변압기와 선로임피던스 등으로 구성하고, ESS부는 1MW용량의 전력변환장치와 배터리로 구성한다. 여기서, 사고를 모의하기 위한 DC선로부는 중성선을 사용하여, Bi-pole 비접지방식을 채택한다.



[그림 9] 대용량 ESS계통의 PSCAD/EMTDC 모델링



[그림 10] 대용량 ESS계통의 절연저항 특성 시뮬레이션 결과

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연저항의 변동특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 펄스신호의 크기는 50[V]이며, 펄스 주파수는 2[Hz]이고, 샘플링 주파수는 1[Hz]로 상정한다. 또한, 1MW의 ESS의 배터리 모듈 및 랙의 기생커패시턴스 값은 0 ~ 0.45[μF]용량으로 가변하면서 절연저항의 값의 변화를 모의하는 것으로 상정한다.

[표3] 시뮬레이션 조건

항목	내역	
ESS 정격 용량	1 [MW]	
샘플링주파수	1[Hz]	
기생커패시턴스	0~0.45[μF]	
절연저항 감시장치	펄스전압	50[V]
	펄스주파수	1[Hz]

### 4.2 기생커패시턴스에 따른 절연저항 특성분석

상기에서 제안한 모델링을 바탕으로, 신호주입방식의IMD 보호기기를 적용한 대용량 ESS단지의 절연저항 특성은 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10의 위의 그림은 ESS의 3상전류 값이고, 아래그림은 배터리의 절연저항 특성을 나타낸 것이고, 또한, 약 30초간 점진적으로 투입되는 기생커패시턴스의 값을 증가시킨 결과 그림과 같이 약 20[MΩ]정도를 유지하던 절연저항 값이 2.5[MΩ]이하까지 저하됨을 확인할 수 있다. 따라서, 배터리의 기생커패시턴스가 증가하는 경우, ESS에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 태양광 연계용 대용량 ESS단지의 계통구성과 배터리 기생커패시턴스에 따른 절연저항특성을 분석하기 위하여, 실 계통 운용사례를 분석하였다. 먼저, 대용량 ESS단지의 계통구성과 접지망을 분석한 결과, 고용량, 고전압으로 구성된 ESS계통의 경우 배터리 기생커패시턴스와 SOC에 따른 전압 값에 변화에 따라 누설이 발생하여, 절연저항 값이 저하될 수 있음을 확인하였다.

또한, 기생커패시턴스 증가에 따른 누설전류의 영향을 분석하기 위하여, H/W 시험장치를 이용한 배터리 기생커패시턴스 특성시험을 수행한 결과, 기생커패시턴스의 값이 증가함에 따라 누설전류의 값도 급격히 증가함을 확인하였다. 한편, 그 특성을 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링하고 시뮬레이션을 수행한 결과, ESS 용량에 따른 배터리 기생커패시턴스 값이 커질수록, 절연저항 값이 현저히 저하됨을 확인하였다. 따라서 향후, 태양광 연계용 대용량 ESS의 IMD가 해당 조건에서 오동작하지 않도록 적절한 운용기준을 마련해야 함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 김재현, 조성구, 우필성, 임현성, 이건호, 송길목, "ESS용 배터리시스템의 기생 정전용량 및 기생 임피던스 측정연구" 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 2148-2149, 2020.07.