

# PSCAD/EMTDC에 의한 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱의 모델링에 관한 연구

정민철\*, 조성덕\*, 김기영\*, 이세연\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:kite0486@naver.com

## A Study on Modeling of Self-energy Balancing of Li-ion Battery Using PSCAD/EMTDC

Min-Chul Jung\*, Sung-Duck Cho\*, Gi-Young Kim\*, Se-Yeon Lee\*, Dae-Seok Rho\*

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

### 요약

최근, 정부의 녹색성장 및 탄소중립 정책에 따라, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 급격하게 증가되고 있다. 그러나, 현장에 설치되어 운용되고 있는 전기저장장치에서 화재가 빈번하게 발생하여, 대규모의 재산피해가 발생되고 있으며, 배터리의 완전충전 이후, 휴지기간 동안에 화재사고가 다수 발생된 것으로 보고되고 있다. 특히, ESS용 리튬이온전지는 수많은 셀들의 직·병렬 조합으로 구성되므로, 열화로 인해 병렬로 연결된 셀들의 SOC 상태가 서로 다른 경우, 의도치 않게 SOC가 높은 셀에서 낮은 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생할 수 있으며, 이러한 현상이 화재의 원인 중 하나로 추정되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 열화셀에 의하여 발생하는 셀프에너지 밸런싱 현상에 의한 사고발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 정상 셀 및 열화 셀에 의한 셀프에너지 밸런싱의 특성을 분석한 결과, SOC가 높은 정상 셀에서 SOC 낮은 열화 셀로 전류가 이동하는 현상을 확인할 수 있었고, 열화셀 대비 정상셀의 병렬 연결 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱에 의한 전류가 크게 증가하여, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었다.

## 1. 서론

최근, 현장에 설치되어 운용되고 있는 전기저장장치에서 화재가 발생하여, 대규모의 재산피해가 빈번하게 보고되고 있으며, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재를 시작으로 현재까지 총 31건의 전기저장장치의 화재가 발생되었으며, 이 중 23건이 신재생에너지 연계용이며, 완전충전 이후, 운전대기 상태인 휴지기간 동안에 계절과 무관하게 화재사고가 발생되었다[1,2]. 특히, ESS용 리튬이온전지는 수많은 셀들이 직·병렬로 조합이 되는데, 열화로 인해 병렬로 연결된 셀들의 SOC 상태가 서로 다른 경우, 의도치 않게 SOC가 높은 셀에서 낮은 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 화재의 원인 중 하나로 고려되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 정상 셀과 열화 셀을 동시에 운용할 경우 발생하는 셀프에너지 밸런싱 현상에 의한 사고발생 메커니즘을 제시하고, 정상 셀과 열화 셀의 비율을 다르게 구성하여 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로

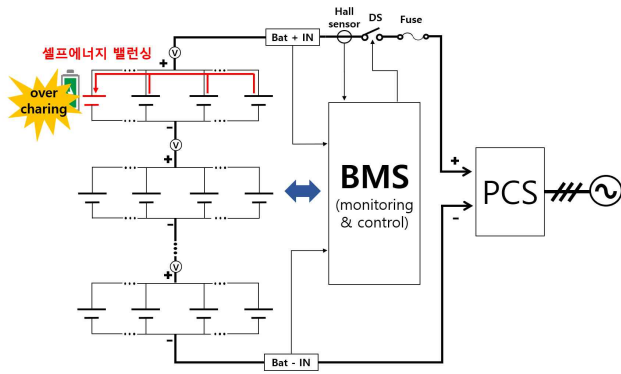
정상 셀 및 열화 셀의 특성을 분석한 결과, 동일한 사양을 가진 정상 셀 대비 열화 셀의 충전용량 비율은 90[%]로 열화에 따른 내부저항의 증가로 10[%]의 고유용량이 감소된 것을 알 수 있었고, 열화의 정도를 평가한 정상셀과 열화셀을 대상으로 셀프에너지 밸런싱 특성을 분석한 결과, SOC가 높은 정상 셀에서 SOC 낮은 열화 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생함을 알 수 있고, 정상셀 대비 열화셀 비율에 따라 셀프에너지 밸런싱 전류가 크게 증가하여, 배터리에 악영향을 미칠 수 가능성이 있음을 알 수 있었다.

## 2. PSCAD/EMTDC에 의한 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 모델링

### 2.1 셀프에너지 밸런싱에 의한 사고발생 메커니즘

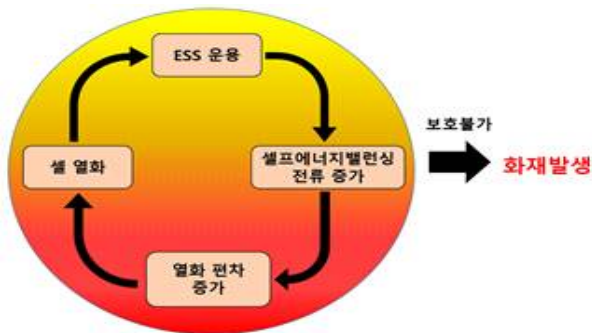
리튬이온전지는 필요로 하는 전압과 용량을 얻기 위하여, 다수의 셀들을 직·병렬로 조합하여, 모듈과 랙으로 구성되며, 조합된 셀들은 운용되거나 시간이 지나면서 서로 열화의 정도가 달라져 그림 1과 같은 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생할 수

있다. 이 그림에서와 같이, 불균일한 열화현상으로 인해 병렬로 연결된 셀들 사이에 고유 용량의 편차가 발생하는 경우, 더 많은 에너지를 가진 타 셀(열화의 정도가 낮음)로부터 상대적으로 에너지가 적은 셀(열화의 정도가 높음)로 에너지가 이동하는 과충전이 발생되는데, 이러한 현상을 셀프에너지 밸런싱이라고 정의한다.



[그림 1] 셀프에너지 밸런싱 개념도

또한, 셀프에너지 밸런싱에 의한 화재발생 메커니즘을 나타내면 그림 2와 같다. 먼저, 다수의 배터리 모듈 및 랙으로 구성된 ESS는 충·방전 운용에 따라 셀이 열화되며, 운용사이클이 증가하거나 다른 외부 요인에 의하여 셀이 악영향을 받을 경우, 열화가 가속되어 편차는 증가하며, 이로 인하여 셀프에너지 밸런싱 전류가 증가한다[3]. 한편, 이러한 셀프에너지 밸런싱은 직렬 연결된 셀 간에 나타나는 OCV 편차와는 달리, 병렬로 연결되어 있어 전압에 의한 검출이 어려워 일반적인 BMS의 기능으로는 보호할 수 없다. 즉, 열화의 편차가 큰 배터리 랙이 완충된 경우, 다른 셀들에 비하여 열화의 정도가 심한 일부 셀들은 이러한 셀프에너지 밸런싱 현상에 의하여, 과충전되는 현상이 발생해 전기저장장치의 화재를 유발할 가능성이 있다.

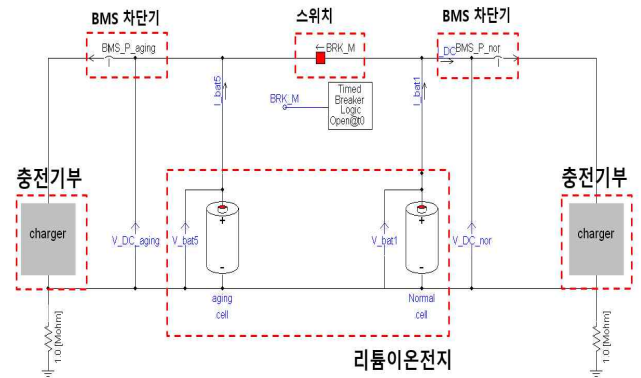


[그림 2] 셀프에너지 밸런싱에 의한 화재발생 메커니즘

## 2.2 셀프에너지 밸런싱의 모델링

리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 특성을 확인하기 위한 전체 시스템의 모델링을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, 리

튬이온전지는 전압, 용량 등을 상정하여 직·병렬로 구성하며 BMS 차단기를 통해 리튬이온전지의 이상 상태시 충전을 종료한다. 또한, 충전기부는 상정된 값까지 리튬이온전지를 충전시키는 역할을 수행하며 충전이 완료된 후에는 충분한 휴지기간을 갖는다. 한편, 스위치는 충전이 완료되어 휴지기간 이후 정상셀과 열화셀을 연결하는 역할을 수행하며, 셀프에너지 밸런싱을 확인한다.



[그림 3] 셀프에너지 밸런싱 모델링

## 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 3.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 정상셀과 열화셀 간의 셀프에너지 밸런싱을 확인하기 위하여, 정상셀과 열화셀의 충전과 셀프에너지 밸런싱 시뮬레이션 조건을 나타내면 표 1과 같다. 표 1에서, 정상셀은 ICR 18650을 대상으로, 내부저항은 제조사에서 제공하는 값인 0.11[Ω]로 상정하고, 열화 셀은 시험 데이터를 참고하여 정상 셀 대비 90[%]의 용량을 갖을 수 있도록 내부저항을 0.158[Ω]로 상정한다. 또한, 셀프에너지 밸런싱 시험은 회로상의 저항의 영향을 줄이기 위하여, 정상셀과 열화셀을 4직렬로 구성하여 모두 동일하게 최대 충전 전압인 16.8[V]에 전압이 도달할 경우, 충전을 종료하며 1시간 이상의 휴지기간을 갖은 후 정상셀과 열화셀을 병렬 연결한다. 한편, 열화 셀 대비 정상셀의 비율이 증가함에 따라 셀프에너지 밸런싱 전류가 증가하는 것을 확인하기 위하여, 정상셀과 열화셀의 비율을 1 대 1, 4 대 1, 16 대 1 및 64 대 1로 수행한다.

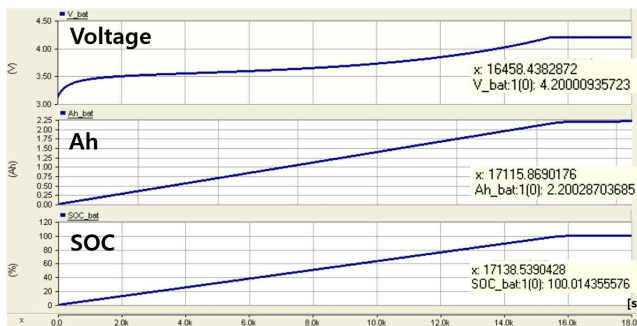
[ 표 1 ] 시뮬레이션 조건

| item         | contents     |          |        |
|--------------|--------------|----------|--------|
| 셀 사양         | 모델           | ICR18650 |        |
|              | 공칭 전압[V]     | 3.7V     |        |
|              | 용량[Ah]       | 2.2      |        |
| 충전 조건        | 방법           | CC-CV    |        |
|              | 전압[V]        | 4.2      |        |
|              | c-rate[C]    | 0.2      |        |
|              | 충전 중지 전류[A]  | 0.002    |        |
|              | 셀 구성         | 1s 4p    |        |
| 셀프에너지 밸런싱 시험 | 정상 셀 내부저항[Ω] | 0.11     |        |
|              | 열화 셀 내부저항[Ω] | 0.158    |        |
|              | 충전 중지 전압[V]  | 16.8     |        |
|              | 정상셀 구성       |          | 4s 4p  |
|              |              |          | 4s 16p |
|              |              |          | 4s 64p |
| 열화셀 구성       | 4s 4p        |          |        |

### 3.2 셀프에너지 밸런싱의 특성분석

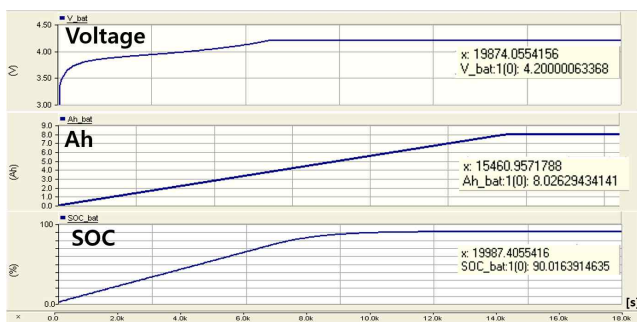
#### 3.2.1 배터리의 열화특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 정상 셀 및 열화 셀의 충전 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 4과 그림 5와 같다. 여기서 그림 4은 정상 셀의 충전 특성이고 정상 셀의 내부저항은 0.11[Ω]로 상정하며, 이때 정상 셀의 SOC는 100[%], Ah 용량은 8.8[Ah]로 나타나고 전압과 전류의 충전 특성이 실제 ICR18650셀의 충전 특성과 유사하게 나타남을 알 수 있다.



[그림 4] 정상 셀 충전 특성

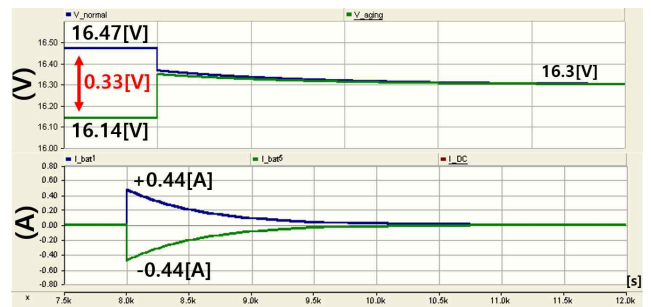
또한, 그림 5는 열화 셀의 충전 특성이고 열화 셀의 내부저항은 0.15[Ω]로 상정한다. 이때, 열화 셀의 SOC는 90[%]이고 Ah 용량은 8[Ah]이다. 여기서, 정상 셀 대비 열화 셀이 열화에 따른 내부저항의 증가로 10[%]의 용량이 감소했음을 알 수 있다.



[그림 5] 열화 셀 충전 특성

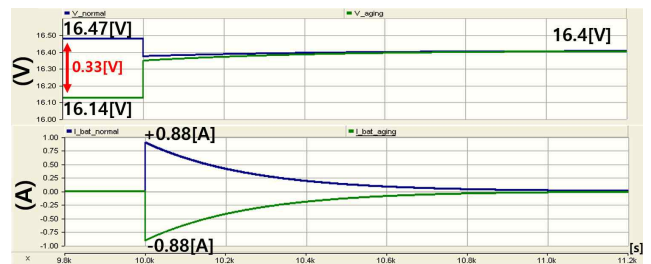
#### 3.2.2 셀프에너지 밸런싱의 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 셀프에너지 밸런싱 특성을 분석하면 그림 6, 그림 7, 그림 8와 같다. 여기서, 그림 6은 정상셀과 열화셀 비율이 1 : 1일 때 셀프에너지 밸런싱 특성이며, 그림 7은 정상셀과 열화셀의 비율이 4 : 1일 때 셀프에너지 밸런싱 특성을 나타낸다. 또한, 그림 8은 정상셀과 열화셀이 각각 16 : 1과 64 : 1일 때 셀프에너지 밸런싱 전류특성을 나타낸다. 먼저, 정상셀과 열화셀의 비율이 1 : 1일 경우, 휴지기간을 거친 후 정상셀과 열화셀은 각각 16.47[V], 16.14[V]을 나타내며, 셀프에너지 밸런싱이 수행된 후에는 16.3[V]의 동일한 전압을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 셀프에너지 밸런싱 전류는 최대 0.44[A]가 발생하는 것을 알 수 있다.



[그림 6] 셀프에너지 밸런싱 특성(1 : 1)

한편, 그림 7은 정상 셀과 열화 셀의 비율이 4 : 1일 때 셀프에너지 밸런싱 특성이며, 정상셀과 열화셀은 휴지기간을 거친 후 각각 16.47[V], 16.14[V]이고, 셀프에너지 밸런싱이 수행된 후에는 16.4[V]의 동일한 전압을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 셀프에너지 밸런싱 전류는 최대 0.88[A]임을 알 수 있다.



[그림 7] 셀프에너지 밸런싱 특성(1대4)

그리고, 그림 8은 셀프에너지 밸런싱 전류 특성을 나타내며, 그림 8(a)는 정상셀과 열화셀의 비율이 16 : 1일 경우이고, 그림 8(b)는 정상셀과 열화셀의 비율이 64 : 1일 경우이다. 정상셀과 열화셀의 비율이 16 : 1과 64 : 1일 때, 셀프에너지 밸런싱 전류는 각각 최대 1.75[A], 3.52[A]임을 알 수 있다. 즉, 열화셀에 비해 정상셀의 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱 전류도 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 정상셀과 열화셀의 비율이 4배 증가할 경우 약 2배의 셀프에너지 밸런싱 전류가 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전기저장장치에서 셀프에너지 밸런싱에 의해 발생하는 사고특성을 확인하기 위하여, 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱의 모델링을 수행하고, 시뮬레이션을 통해 셀프에너지 밸런싱 특성을 평가한다. 주요 연구결과를 요약하면, 다음과 같다.

(1) 리튬이온전지의 정상셀과 열화셀의 용량특성을 분석하기 위하여 충전 시뮬레이션시험을 수행한 결과, 정상셀과 열화셀의 충전용량은 각각 8.8[Ah], 8.0[Ah]임을 알 수 있다. 즉, 정상셀 대비 열화셀의 충전용량 비율은 90[%]로 나타나며, 열화율은 10[%]임을 확인할 수 있다.

(2) 셀프에너지 밸런싱 특성을 확인하기 위하여, 정상셀과 열화셀의 최대 전압까지 충전 후 충분한 휴지시간을 가지고 정상셀과 열화셀을 병렬 연결하면, 정상셀과 열화셀의 비율이 1 대 1에서 4 대 1로 증가함에 따라, 셀프에너지 밸런싱 전류도 0.44[A]에서 0.88[A]로 증가하는 것을 확인할 수 있어 배터리에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

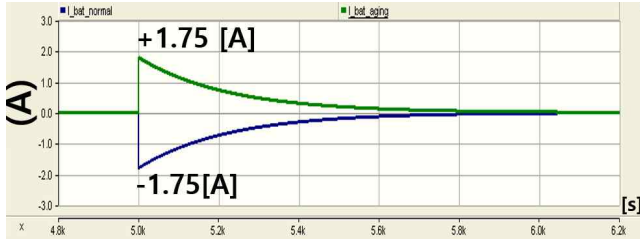
(3) 열화셀과 정상셀의 병렬 연결 비율에 따른 셀프에너지 밸런싱 전류의 증가 특성을 확인하기 위하여, 열화셀 대비 정상셀의 비율을 1배, 4배, 16배, 64배 증가시키며 분석한 결과, 용량이 4배 증가할때마다 셀프에너지 밸런싱 전류도 0.44[A], 0.88[A], 1.75[A], 3.52[A]로 약 2배씩 증가하는 것을 확인할 수 있다.

#### 감사의 글

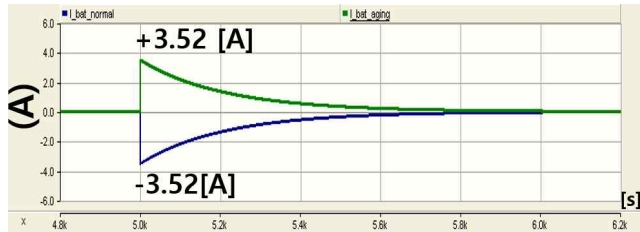
본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 세방전기의 지원을 받아 수행한 연구(No.20182410105070)로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 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, vol. 32, no. 6, pp.91-99, 2018.12.  
 [3] 김지명, 이후동, 태동현, 페레이라 마리토, 박지현, 노대석 "셀프에너지 밸런싱을 고려한 리튬이온전지의 Battery Management System 구현", 한국산학기술학회 3권 21호, pp. 585-593, 2020. 3.



(a) 정상셀 : 열화셀 = 16 : 1

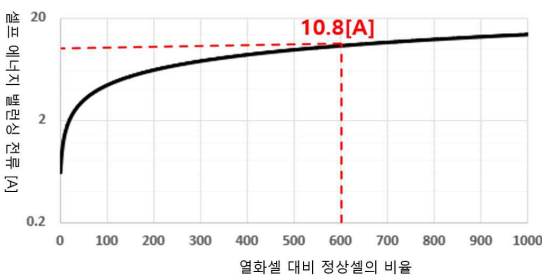


(b) 정상셀 : 열화셀 = 64 : 1

[그림 8] 셀프에너지 밸런싱 전류 특성

#### 3.3 종합분석

상기의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 셀프에너지 밸런싱 특성을 분석한 결과, 정상셀과 열화셀의 비율이 1 대 1일 경우와 4 대 1일 경우, 시뮬레이션 결과가 각각 0.44[A], 0.88[A]로 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 열화셀 대비 정상셀의 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱 전류의 증가 특성은 그림 9와 같다. 여기서, 열화셀 대비 정상셀의 병렬 연결 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱 전류도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 그림 9의 셀프에너지 밸런싱 전류의 특성을 이용하여, 본 논문에서 사용한 18650 리튬이온전지를 이용해 750[V], 1[MWh]를 갖는 배터리시스템을 상정하면, 하나의 열화셀 대비 병렬 연결된 정상셀은 600개로 구성되므로, 열화셀의 용량 대비 약 5배에 해당하는 10.8[A]의 셀프에너지 밸런싱 전류가 열화셀로 유입된다. 따라서, 대용량 ESS에서 셀프에너지 밸런싱 전류에 의해 배터리가 악영향을 받아 화재의 가능성이 있음을 알 수 있었다.



[그림 9] 열화셀 비율에 따른 셀프에너지 밸런싱 전류 특성