

ESS용 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 모델링에 관한 연구

정민철*, 김지명*, 태동현*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:kite0486@naver.com

A Study on Modeling of Self-Energy Balancing for Li-ion Battery in Energy Storage System

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

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

요약

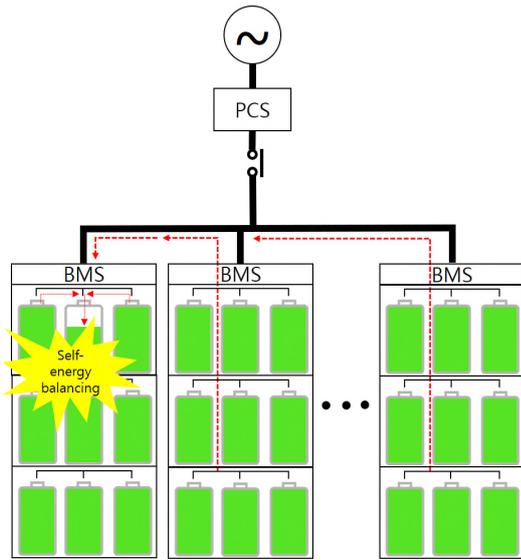
현재까지 총 29건의 전기저장장치의 화재가 발생되었으며, 이 중 22건이 신재생에너지 연계용이며, 완전충전 이후, 운전대기 상태인 휴지 기간에 계절과 무관하게 화재 사고가 발생되었다. 이것은 병렬로 연결된 셀들의 SOC 상태가 서로 다른 경우, 의도하지 않게 SOC가 높은 셀에서 낮은 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상으로, 일부 셀이 과충전되어 열 폭주로 인한 화재의 원인으로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 열화 셀과 정상 셀 간의 셀프에너지 밸런싱을 확인하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 정상 셀과 열화 셀을 모델링하고, 모델링한 정상 셀과 열화 셀에 대하여 셀프에너지 밸런싱 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 수행 결과, SOC가 높은 정상 셀에서 SOC가 낮은 열화 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생하며 이로 인해 일부 셀이 과충전되어 열 폭주로 화재의 원인이 될 가능성이 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

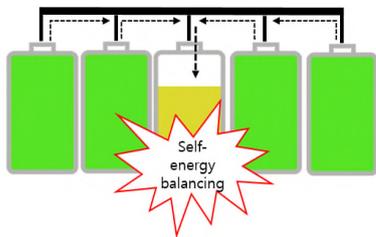
최근, 전 세계적으로 지구 규모 적인 환경문제를 해결하기 위하여, 필요한 전력의 100%를 신재생에너지로 공급하는 RE100 캠페인이 글로벌 기업과 환경단체 위주로 진행되고 있다. 이러한 세계적 추세에 따라, 우리나라 정부는 석탄 화력 및 원전의 발전 비중을 줄이고, 신재생에너지전원의 발전량을 증가시키는 정책들을 시행하고 있다. 그러나, 현장에 설치되어 운용되고 있는 전기저장장치에서 화재가 발생하여, 대규모의 재산피해가 빈번하게 보고되고 있다. 현재까지 총 29건의 전기저장장치의 화재가 발생되었는데, 이 중 22건이 신재생에너지 연계용이며, 완전충전 이후, 운전대기 상태인 휴지기간 동안에 계절과 무관하게 화재사고가 발생되었다[1-2]. 이것은 병렬로 연결된 셀들의 SOC 상태가 서로 다른 경우, 의도하지 않게 SOC가 높은 셀에서 낮은 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상으로, 일부 셀이 과충전되어 화재의 원인으로 고려되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, 전기저장장치의 셀프에너지 밸런싱 특성 분석한다. 셀프에너지 밸런싱 특성을 분석한 결과, SOC가 높은 정상 셀에서 SOC 낮은 열화 셀로 전류가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

2. 리튬이온전지의 셀프에너지 밸런싱 특성

리튬이온전지는 필요로 하는 전압과 용량을 얻기 위하여, 수 많은 셀들이 직·병렬로 구성된다. 조합된 셀들은 운용되거나 시간이 지나면서 서로 상태의 편차가 달라져 그림 1, 그림 2와 같은 현상이 발생할 수 있다. 여기서 그림 1은 BMS 랙 간의 셀프에너지 밸런싱 개념도이고 그림 2는 셀 간의 셀프에너지 밸런싱 개념도이다. 참조 그림들과 같이, 조합되어 사용되는 셀들은 사용환경, 사용조건 등의 영향으로 열화가 진행되고 이 편차는 셀마다 다를 수 있다. 또한, 열화가 진행되면서 전지의 내부 저항이 증가하게 되고 이로 인해 전지 고유의 용량이 감소된다. 이때, 열화가 상대적으로 진행되지 않아 용량의 여유가 있는 병렬 연결된 타 셀들로부터 열화된 셀로 에너지가 흐르게 되는데, 이러한 현상을 셀프에너지 밸런싱이라고 정의한다. 이것은 직렬 연결된 셀 간에 나타나는 OCV 편차와는 달리, 병렬로 연결되어 있어 전압에 의한 검출이 어렵기 때문에 일반적인 BMS의 기능으로는 보호가 불가능하다. 특히, 충전을 완료하여 배터리 랙의 SOC가 높은 경우, 상대적으로 열화된 일부 셀들이 셀프에너지 밸런싱 현상에 의해 과충전되어, 전기저장장치의 화재를 유발할 가능성이 있다.



[그림 1] BMS 랙 간의 셀프에너지 밸런싱 개념도

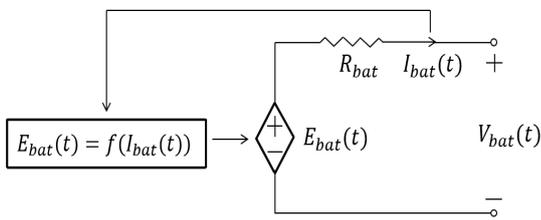


[그림 2] 셀 간의 셀프에너지 밸런싱 개념도

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 셀프에너지 밸런싱 모델링

3.1 리튬이온전지 모델링

리튬이온전지의 모델링은 그림 3과 같이 내부전압 및 내부 저항으로 구성된 등가회로를 적용한다[3]. 여기서, $E_{bat}(t)$ 는 배터리의 기전력, $V_{bat}(t)$ 는 배터리의 단자전압 그리고 R_{bat} 은 배터리의 내부저항이다.



[그림 3] 셀 간의 셀프에너지 밸런싱 개념도

구체적으로, 배터리의 기전력 $E_{bat}(t)$ 는 SOC의 역함수와 지수함수의 조합으로 나타내며, 여기서 SOC는 배터리 전체 용량에서 누적된 전류의 비로 충전상태를 의미한다. 또한, 배터리 단자전압 $V_{bat}(t)$ 는 기전력 $E_{bat}(t)$ 에서 내부저항에 의한 전압 강하를 뺀 값이며, 이를 수식으로 나타내면 식 (1) ~ 식 (3)와 같다.

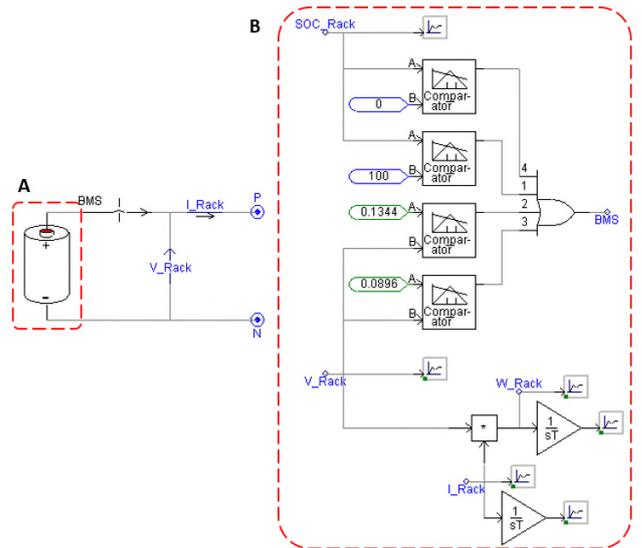
$$E_{bat}(t) = E_0 - K \frac{1}{SOC} + A \exp(-BQ(1 - SOC)) \quad (1)$$

$$SOC = \frac{Q - \int_{t_0}^{t_1} I_{bat}(t) dt}{Q} \times 100 \quad (2)$$

$$V_{bat}(t) = E_{bat}(t) - I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (3)$$

여기서, $E_{bat}(t)$: 배터리 기전력, E_0 : 배터리 전압 상수, K : 양극화 상수, Q : 배터리 용량, A : 지수함수 크기 상수, B : 반전지수함수 시간 상수, SOC : 충전상태(%), $V_{bat}(t)$: 배터리 전압, R_{bat} : 배터리 내부저항, $I_{bat}(t)$: 배터리 전류

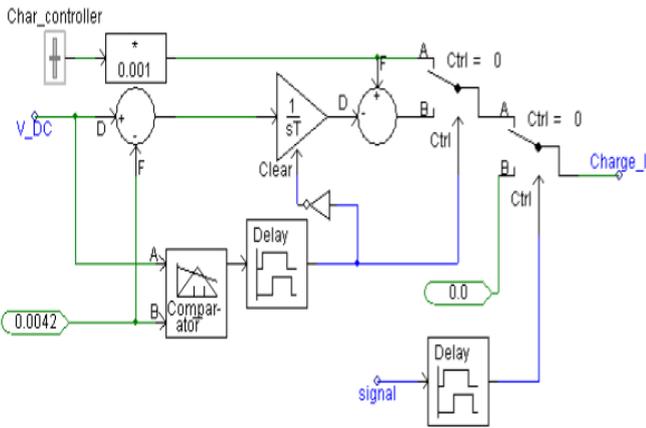
따라서, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배터리의 등가회로를 모델링하면 그림 4의 A부분이고, 보호동작을 수행하기 위한 BMS를 나타내면 그림 4의 B부분이다. 여기서, BMS는 SOC가 0~100%의 범위를 벗어나거나 전압이 설정된 범위를 벗어나면, 배터리의 회로를 차단하도록 제어한다.



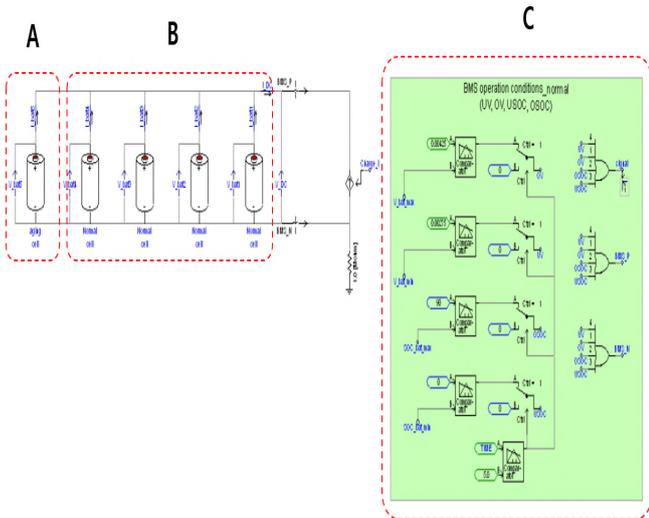
[그림 4] 정상 셀과 열화 셀간의 셀프에너지 밸런싱 모델링

3.2 셀프에너지 밸런싱 모델링

3.1절의 리튬이온전지 모델링을 바탕으로 셀프에너지 밸런싱을 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 리튬이온전지를 충전시키기 위한 PI제어를 활용한 충전기 모델링이고 그림 5(b)는 셀프에너지 밸런싱의 특성을 확인하기 위한 PSCAD/EMTDC 내의 회로도도 와 BMS이다. 또한, 그림 5(b)의 A는 열화 셀, B는 정상 셀, C는 BMS를 나타낸다.



(a) 충전 제어기 모델링



(b) 회로 및 BMS 모델링

[그림 5] 정상 셀과 열화 셀간의 셀프에너지 밸런싱 모델링

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 조건

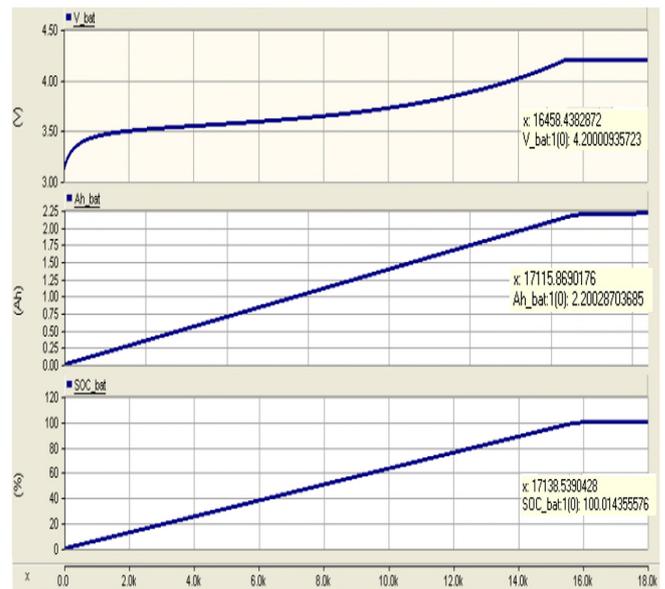
시뮬레이션에 적용된 정상 셀의 ICR18650을 대상으로 모델링 하며, 내부 저항은 0.11[Ω]로 상정하고, 열화 셀은 실험 데이터를 참고하여 정상 셀 대비 92.5%의 용량을 갖을 수 있도록 내부 저항을 0.197[Ω]로 상정한다[4]. 또한, 셀프에너지 밸런싱 시험에서 일반적인 ESS의 배터리 운용 특성을 참고하여 셀의 운용 범위는 전압 기준 3~4[V](Depth of Discharge 80[%] 기준)로 상정하며 열화 셀 대비 정상 셀의 비율이 증가함에 따라 셀프에너지 밸런싱 전류가 커지는 것을 확인하기 위하여, 열화 셀과 정상 셀의 비율은 1 대 1, 1 대 4로 시뮬레이션한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

item	contents	
셀 사양	모델	ICR18650
	공칭 전압	3.6V
	용량	2.2Ah
충전 시험	방법	CC-CV
	전압	4.2V
	c-rate	0.2C
	충전 중지 전류	0.002A
셀프에너지 밸런싱 시험	셀 구성	1s 1p
	정상 셀 내부 저항	0.11Ω
	열화 셀 내부 저항	0.197Ω
	셀 구성(열화 셀:정상 셀)	1:1, 1:4

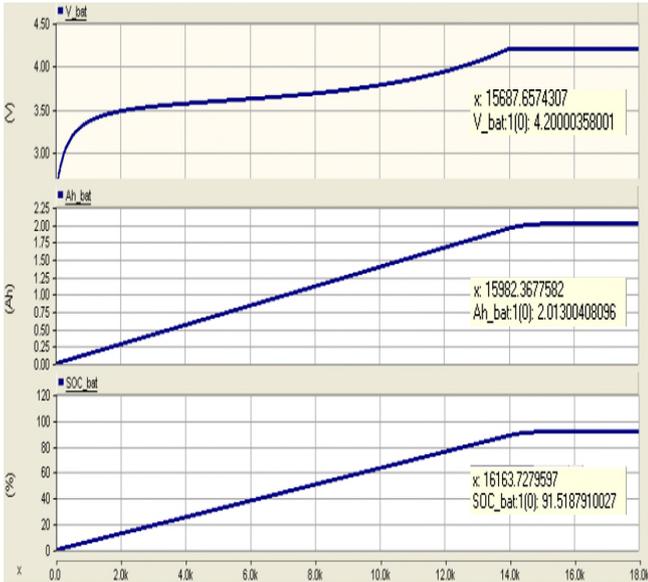
4.2 정상 셀 및 열화 셀 충전 특성 분석

4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 정상 셀 및 열화 셀의 충전 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 6과 그림 7과 같다. 여기서 그림 6은 정상 셀의 충전 특성이고 정상 셀의 내부 저항은 0.11[Ω]로 상정하며, 이때 정상 셀의 SOC는 100[%], Ah 용량은 2.2[Ah]로 나타나고 전압과 전류의 충전 특성이 실제 ICR18650셀의 충전 특성과 유사하게 나타남을 알 수 있다.



[그림 6] 정상 셀 충전 특성

또한, 그림 7은 열화 셀의 충전 특성이고 열화 셀의 내부 저항은 0.197[Ω]로 상정한다. 이때, 열화 셀의 SOC는 91.5[%]이고 Ah용량은 2.01[Ah]이다. 여기서, 정상 셀 대비 열화 셀이 열화에 따른 내부 저항의 증가로 8.5%의 고유용량이 감소했음을 알 수 있다.



[그림 7] 열화 셀 충전 특성

4.3 충전 시, 셀프에너지 밸런싱 특성 분석

4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 4.2절에서 시뮬레이션한 열화 셀과 정상 셀을 대상으로 셀프에너지 밸런싱 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 8, 그림 9와 같다. 여기서 그림 8는 열화 셀과 정상 셀 비율이 1 대 1일 때 시뮬레이션 결과이며, 최대 0.42[A]의 셀프에너지 밸런싱 전류가 발생하는 것을 알 수 있다.



[그림 8] 열화 셀 충전 특성

또한, 그림 9는 열화 셀과 정상 셀의 비율이 1 대 4일 때 시뮬레이션 결과이며, 셀프에너지 밸런싱 전류는 최대 0.48[A]임을 알 수 있었다. 그러므로, 열화 셀과 정상 셀의 비율이 1 대 1일 경우보다 1 대 4일 경우에 같은 셀을 대상으로 모델링을 수행한 결과, 더 많은 셀프에너지 밸런싱 전류가 발생함을 알 수 있다.



[그림 9] 열화 셀 충전 특성

5. 결 론

본 논문에서는 리튬이온전지의 열화 셀과 정상 셀 간의 셀프에너지 밸런싱을 모델링한다. 이때, 정상 셀과 열화 셀 모델은 제조사 제공 자료와 시험데이터를 참고하여 정상 셀 내부 저항 0.11[Ω], 열화 셀 0.197[Ω]로 상정하며 정상 셀 대비 8.5[%] 열화된 열화 셀을 모델링한다. 모델링한 열화 셀과 정상 셀을 대상으로 셀프에너지 밸런싱 모델링을 수행한 결과, 열화 셀과 정상 셀의 비율이 1 대 1일 경우, 최대 0.41[A]의 셀프에너지 밸런싱 전류가 발생하였고 1 대 4일 경우, 최대 0.48[A]의 셀프에너지 밸런싱 전류가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 이러한 셀프에너지 밸런싱 전류로 인하여 일부 셀이 과충전 되어 열 폭주로 화재의 원인이 될 가능성이 있음을 알 수 있었다.

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] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, Abdel-Ilhah Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 284-289, 2007.
- [4] 김지명, 이후동, 태동현, 페레이라 마리토, 박지현, 노대석 "셀프에너지 밸런싱을 고려한 리튬이온전지의 Battery Management System 구현", 한국산학기술학회 3권 21호, pp. 585-593, 2020. 3.