

셀프에너지 밸런싱을 고려한 리튬이온전지용 BMS의 운용알고리즘에 관한 연구

정민철*, 김지명*, 신건*, 황승욱*, 노대석*

*한국기술교육대학교

E-mail:kite0486@naver.com

Operation Algorithm of Battery Management System for Li-ion Battery Considering Self-energy Balancing

Min-Chul Jung*, Ji-Myung Kim*, Jian Shen*, Seung-Wook Hwang*, 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 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 ESS의 셀프에너지 밸런싱을 방지하는 새로운 BMS의 회로구성과 운용알고리즘을 제안하고, Labview S/W를 이용하여 배터리부, 충전기부, 셀프에너지 밸런싱부로 구성된 BMS를 구현한다. 셀프에너지 밸런싱의 모델링과 BMS를 바탕으로 정상 셀 및 열화 셀의 특성을 분석한 결과, 열화 셀 대비 정상 셀의 병렬 연결 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱에 의한 전류가 크게 증가하여, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있었고, 셀프에너지 밸런싱 전류가 과도하게 높아지는 경우, BMS가 셀들의 병렬연결을 분리하여 리튬이온전지의 안전성을 향상시킬 수 있어, 본 논문에서 제안한 BMS의 유용성을 확인하였다.

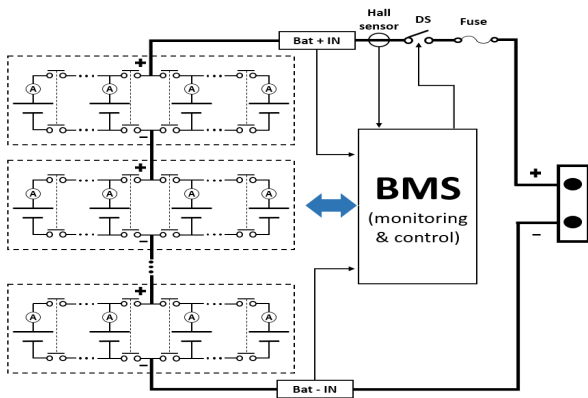
1. 서 론

최근, 정부의 녹색성장 및 탄소중립 정책에 따라, 우리나라 정부는 석탄 화력 및 원전의 발전 비중을 줄이고, 신재생에너지원의 발전량을 증가시키는 정책들을 시행하고 있으며 신재생 에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 급격하게 증가되고 있다[1-2]. 그러나, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재로 시작으로 현재까지 총 31건의 전기저장장치의 화재가 발생되었으며, 이 중 24건이 신재생에너지 연계용이며, 완전충전 이후 운전 대기 상태인 휴지기간 동안에 계절과 무관하게 화재사고가 발생된 것으로 보고되고 있다. 특히, ESS용 리튬이온전지는 수많은 셀들의 직·병렬 조합으로 구성되므로, 배터리 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 화재

의 원인 중 하나로 추정되고 있다[3]. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 셀프에너지 밸런싱을 방지하는 새로운 BMS의 회로구성과 운용알고리즘을 제안하고, Labview S/W를 이용하여 배터리부, 충전기부, 셀프에너지 밸런싱부로 구성된 리튬이온전지용 BMS를 구현한다. 셀프에너지 밸런싱의 모델링과 BMS를 바탕으로 정상 셀 및 열화 셀의 특성을 분석한 결과, 열화 셀의 충전용량은 동일한 사양을 가진 정상 셀 대비 약 90[%]로, 열화에 따른 내부저항의 증가로 10[%]의 고유용량이 감소된 것을 알 수 있다. 또한, 정상 셀 및 열화 셀에 의한 셀프에너지 밸런싱의 특성을 분석한 결과, SOC가 높은 정상 셀에서 SOC 낮은 열화 셀로 전류가 이동하는 현상을 확인할 수 있고, 열화 셀 대비 정상 셀의 병렬 연결 비율이 증가할수록 셀프에너지 밸런싱에 의한 전류가 크게 증가하여, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 셀프에너지 밸런싱 전류가 과도하게 높아지는 경우, BMS가 셀들의 병렬연결을 분리하여 리튬이온전지의 안전성을 향상시킬 수 있어, 본 논문에서 제안한 BMS의 유용성을 확인하였다.

2. 셀프에너지 밸런싱을 고려한 BMS의 운용알고리즘

본 논문에서는 ESS의 안전성을 향상시키기 위하여, 병렬 연결된 셀 간 전압편차에 의해 발생하는 셀프에너지 밸런싱 현상을 고려한 BMS의 회로구성을 그림 1과 같이 제안한다. 이 그림에서와 같이, 기존의 직렬 연결된 셀들의 전압과 온도를 측정하는 방식에 추가적으로 병렬 연결된 셀의 전류를 측정하는 계측기와 셀 간의 병렬연결을 차단할 수 있는 보호장치를 설치하여 구성한다. 이러한 구성은 병렬 연결된 셀들의 SOC 편차에 의하여 발생할 수 있는 셀프에너지 밸런싱 전류를 검출할 수 있고, 보호장치를 동작하여 밸런싱 전류를 차단할 수 있어, BMS의 안전성을 향상시킬 수 있다.



[그림 1] 제안한 리튬이온전지용 BMS의 구성

또한, 배터리 랙은 용도에 따라 필요로 하는 전압과 용량을 얻기 위하여 여러 리튬이온전지의 셀들이 직·병렬로 조합되어 구성된다. 그러나, 병렬 연결된 셀들의 SOC 상태가 서로 다른 경우, SOC가 높은 셀에서 낮은 셀로 에너지가 이동하는 셀프에너지 밸런싱 현상이 발생할 수 있다. 특히, 구성된 셀들 중에 열화되거나 편차가 큰 셀이 있는 경우, 이 셀은 과충전되어, 열폭주가 발생하여 화재의 원인이 될 수 있다. 이러한 셀프에너지 밸런싱을 고려한 BMS의 운용알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 대상 배터리 랙의 측정요소 및 제어판단 범위를 설정하고, 측정 시간대 t 를 초기 값으로 설정한다.

[Step 2] t 시간대에서의 대상 배터리 랙에 대하여, 각 셀의 전압, 전류, 온도를 측정하고, 셀의 상태가 정상범위에 있는지 판단한다. 여기서, 셀의 상태가 정상인 경우에는 PCS가 운전 대기 상태인지 확인하고, 대기 중이면 셀프에너지 밸런싱 전류(I_{self})가 설정치를 초과하는지 평가한다.

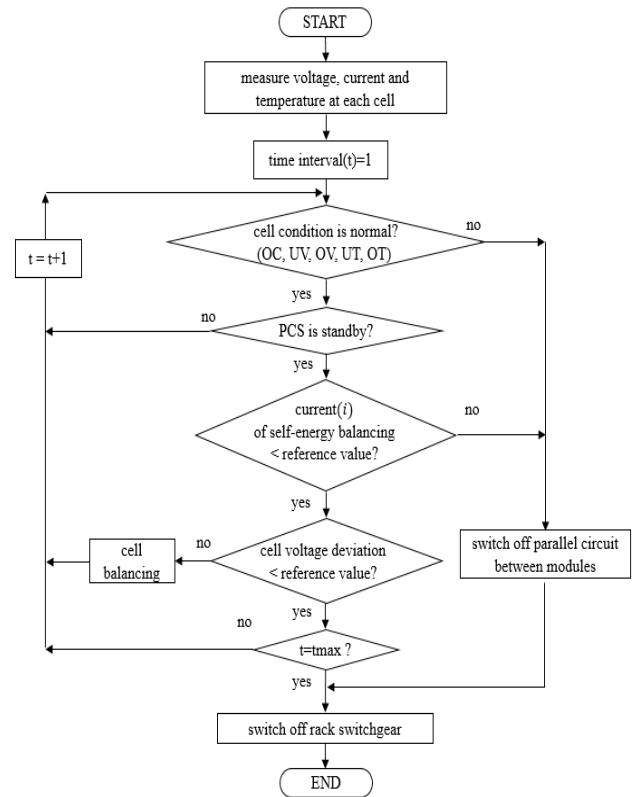
[Step 3] [Step 2]에서 셀의 상태가 비정상이거나 셀프에너

지 밸런싱 전류(I_{self})가 설정치를 초과하는 경우, 모듈 간 병렬 연결을 분리하는 개폐장치를 동작시키고, 해당 배터리 랙의 개폐장치도 분리시킨다. 한편, 셀의 상태가 정상범위에 있고, PCS가 충전 또는 방전운전을 하는 경우에는 [Step 2]로 넘어가 해당 과정을 반복한다.

[Step 4] [Step 3]에서 셀프에너지 밸런싱 전류(I_{self})가 설정치 미만인 경우, 모든 셀의 전압 편차가 기준치를 초과하는지 판단하고, 초과하면 셀 밸런싱을 수행한 후, [Step 2]로 진행한다.

[Step 5] [Step 4]에서 셀의 전압 편차가 기준값 미만인 경우에는 운용 시간대 t 가 최대값인지 확인하고, 최대값에 도달하면 해당 배터리 랙의 개폐장치를 분리시킨다.

상기의 BMS 운용알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.

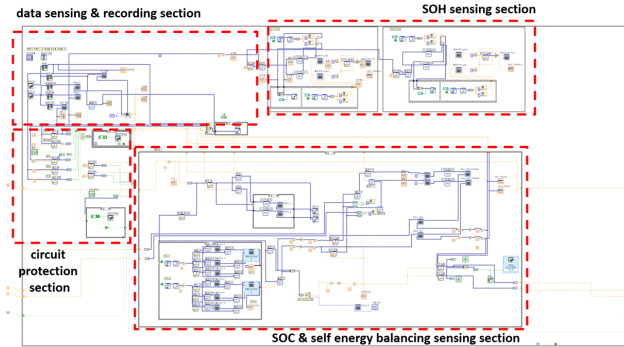


[그림 2] 셀프에너지를 고려한 리튬이온전지용 BMS의 운용 알고리즘

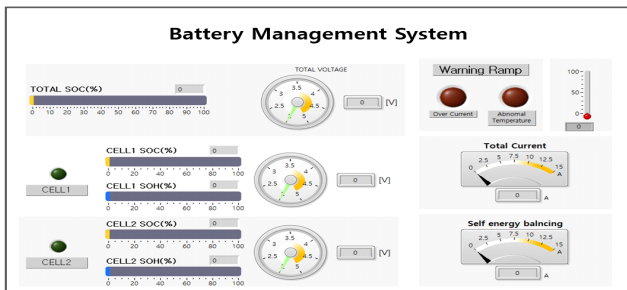
3. 셀프에너지 밸런싱을 고려한 리튬이온전지용 BMS의 구현

BMS는 그림 3과 같이 LABVIEW S/W를 이용하여 구성한다. 여기서, BMS는 데이터 측정 및 기록부, SOC 및 셀프에너

지 밸런싱 측정부, 회로보호부, SOH 측정부로 구성되며, DAQ 모듈을 이용하여 리튬이온전지의 전압, 전류 및 SOC를 측정한다. 또한, BMS는 과전압, 저전압, 과전류, 과온도, 셀프에너지 밸런싱 등이 발생하는 경우 회로를 차단하는 보호기능을 가진다. 또한, 그림 4는 BMS의 메인메뉴를 나타내며, 각 전지의 전압, 전류, 온도, SOC, SOH, 셀 밸런싱, 셀프에너지 밸런싱 등의 정보를 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 구성한다.



[그림 3] LABVIEW S/W를 이용한 BMS 구성도



[그림 4] Labview S/W를 이용한 BMS의 메인메뉴

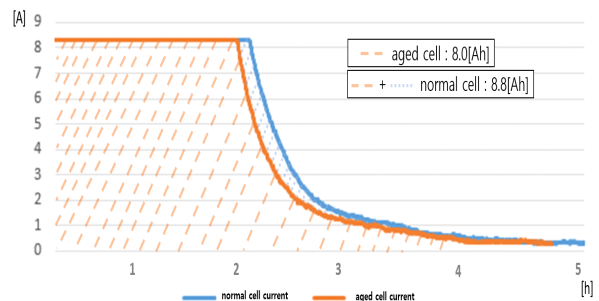
4. 셀프에너지 밸런싱을 고려한 BMS 특성분석

본 논문에서 제안한 정상셀과 열화셀 간의 셀프에너지 밸런싱을 확인하기 위하여, 정상셀과 열화셀의 충전과 셀프에너지 밸런싱 시뮬레이션 조건을 나타내면 표 1과 같다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

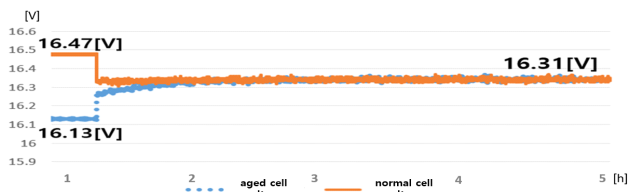
시험	조건	
셀 사양	모델	ICR18650
	공칭전압[V]	3.7V
	용량Ah]	2.2
충전조건	충전방법	CC-CV
	충전상한전압[V]	4.2
	C-rate	0.2
	셀 구성	1s 4p
셀프에너지 밸런싱 시험 조건	정상 셀 내부저항[Ω]	0.11
	열화 셀 내부저항[Ω]	0.158
	충전상한전압[V]	16.8
	정상 셀 유닛 구성	4s 4p
	열화 셀 유닛 구성	4s 16p

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 휴지시간을 갖은 후 정상셀과 열화셀을 병렬 연결한다. 한편, 구현한 BMS 시험장치에 의하여 정상 셀 및 열화 셀 unit의 충전 특성을 나타내면 그림 5과 같다. 여기서 그림 5의 A 곡선은 정상 셀 unit의 충전 특성이고, 용량은 8.8[Ah]가 산정되어, 제조사(ICR18650)에서 제시한 셀의 충전 특성과 용량 특성이 유사함을 알 수 있다. 또한, 그림 5의 B 곡선은 열화 셀 unit의 충전 특성이고, 용량은 8[Ah]로 나타남을 알 수 있다. 즉, 열화 셀 unit의 경우 내부저항이 증가하여, 정상 셀 unit에 비해 용량이 약 10[%] 정도 감소함을 알 수 있다.

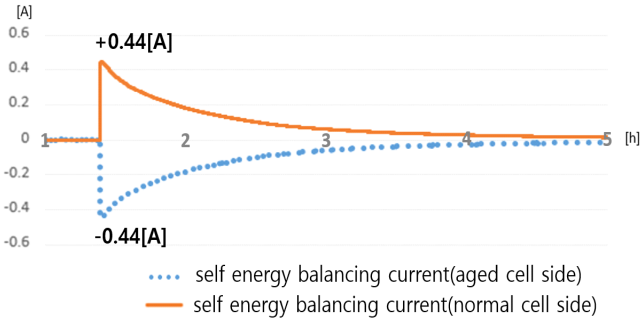


[그림 5] 정상 셀 및 열화 셀 unit의 충전 특성

한편, 표 1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 셀프에너지 밸런싱 특성을 분석하면 그림 6과 그림 7과 같다. 먼저, 그림 6은 정상 셀 unit과 열화 셀 unit의 비율이 1:1일 때 셀프에너지 밸런싱의 전압 특성을 나타낸 것이며, 정상 셀 unit과 열화 셀 unit의 단자전압은 각각 16.47[V], 16.13[V]으로 산정된다. 한편, 그림 7은 셀프에너지 밸런싱의 전류 특성을 나타낸 것으로, 정상 셀 unit에서 열화 셀 unit로 최대 0.44[A] 만큼의 전류가 흘러 들어가, 열화 셀의 과충전 현상이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

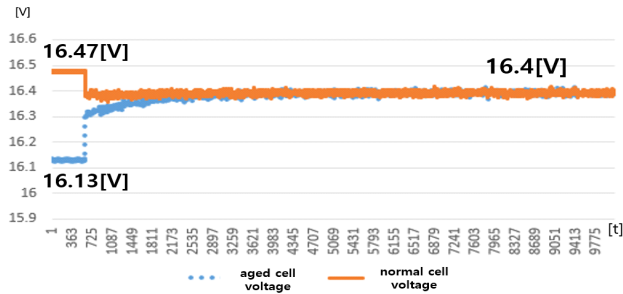


[그림 6] 정상 셀 unit 및 열화 셀 unit의 전압 특성

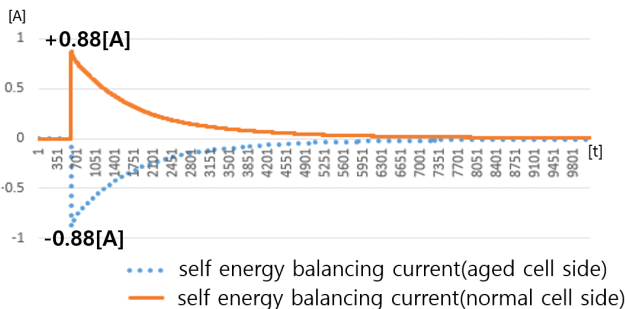


[그림 7] 정상 셀 unit 및 열화 셀 unit의 전류 특성

또한, 그림 8은 정상 셀 unit와 열화 셀 unit의 비율이 4:1일 때 셀프에너지 밸런싱의 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 그림 8은 정상 셀 unit와 열화 셀 unit의 전압 특성을 나타낸 것으로 각각 16.47[V], 16.13[V]으로 산정되고, 그림 9는 셀프에너지 밸런싱의 전류 특성을 나타낸 것으로, 정상 셀 unit에서 열화 셀 unit로 최대 0.88[A] 만큼의 전류가 유입되어, 열화 셀 unit에서 과충전 현상이 발생 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 정상 셀과 열화 셀의 비율이 증가하면, 셀프에너지 밸런싱 전류도 비례적으로 증가하여, 열화 셀에서 과충전 현상이 발생할 수 있음 있음을 알 수 있다.



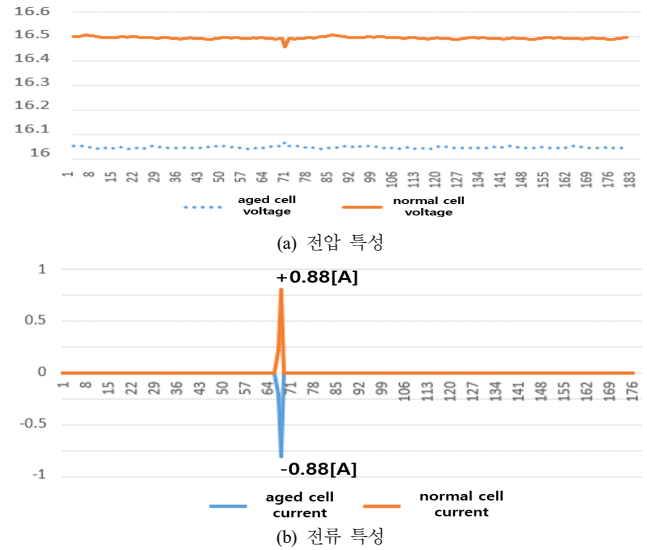
[그림 8] 정상 셀 unit 및 열화 셀 unit의 전압 특성



[그림 9] 정상 셀 unit 및 열화 셀 unit의 전류 특성

정상 셀 unit과 열화 셀 unit간의 셀프에너지 밸런싱을 방지하기 위하여, 제안한 운용 알고리즘을 바탕으로 셀프에너지 밸런싱 차단 시험을 수행하면 그림10과 같다. 여기서, 그림 10(a)는 셀프에너지 밸런싱 발생에 따른 정상 셀 unit과 열화 셀 unit의 전압 특성이며, 그림 10(b)는 전류 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 셀프에너지 밸런싱 전류가 기준치를 초과하면, 제어 장치에 의하여 정상 셀 unit과 열화 셀 unit

사이의 회로를 차단하여, 셀프에너지 밸런싱이 방지됨을 알 수 있다. 따라서, 셀프에너지 밸런싱이 발생할 경우, 구현한 BMS에 의하여 보호회로가 동작되어, 셀프에너지 밸런싱 전류를 안전하게 차단할 수 있으므로, 제안한 운용알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.



[그림 10] 제한한 BMS에 의한 셀프에너지 밸런싱 특성

4. 결 론

본 논문에서는 ESS의 안전성을 향상시키기 위하여, 셀 간 SOC 편차에 의해 의도치 않게 발생하는 셀프에너지 밸런싱 전류를 안전하게 차단하는 BMS의 운용알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로, 셀프에너지 밸런싱의 모델링과 BMS에 의하여 셀프에너지 밸런싱 특성을 평가하였다. 제안한 BMS와 알고리즘을 바탕으로 셀프에너지 밸런싱 특성을 평가한 결과, 정상셀과 열화셀의 병렬 연결 비가 증가할수록 높은 셀프에너지 밸런싱 전류가 발생함을 알 수 있고 제안한 BMS를 적용할 경우, 안전하게 셀프에너지 밸런싱이 방지됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)와 중소벤처기업부의 기술개발 사업 지원에 의한 연구(S2854105)로서, 관계 부처에게 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.