

공유형 전동킥보드의 안전성 향상을 위한 Battery Safety Management System 구현에 관한 연구

신건*, 김지명*, 정민철*, 최익준*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

A Study on Implementation of Battery Management System for Enhancing Safety of Sharing Electric Kickboard

JIAN SHEN*, Ji-Myung Kim*, Min-Chul Jung*, Ik-Joon Choi*, and Dae-Seok Rho*

*Korean University of Technology and Education

요 약

일반적으로, 전동킥보드에는 BMS(battery management system)가 설치되어 과충전, 과방전, 과전압, 과전류보호 등과 같은 보호기능을 수행하고 있다. 하지만, 이러한 BMS가 설치되었음에도 불구하고, 전동킥보드에서 발생한 화재사고 건수는 2018년에 5건, 2019년에 10건, 2020년에 39건으로 매년 기하급수적으로 늘어나는 추세이고, 그중 대부분은 충전 또는 휴지기간 중 전동킥보드용 리튬이온배터리에서 발생한 것이다. 특히, 공유형 전동킥보드의 경우, 사용 패턴이 일정하지 않고, 운전성향이 다른 다수의 사용자가 공유하는 특성으로 인해 배터리의 노화 및 셀간 전압차가 개인용보다 더 많이 발생하여, 화재사고에 더 쉽게 노출될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 공유형 전동킥보드의 안전성 향상을 위한 BSMS(battery management system)를 구현하여, 리튬이온배터리 셀간 전압차가 감지될 경우, 셀밸런싱 알고리즘을 통하여 셀간 전압차를 제조사에서 제공하는 셀간 허용전압차 이내로 감소시킴으로써, 저전압 셀이 과충전되는 것을 방지한다. 또한, BSMS의 오프가스 검출 알고리즘은 외기로부터 유입된 유사 오프가스로부터 리튬이온배터리에서 발생하는 오프가스를 정확하게 식별하고, 오프가스가 검출되었을 경우, 충전회로를 즉시 차단하여 열폭주가 발생하는 것을 방지한다.

1. 서 론

최근, 국내의 전동킥보드를 포함하는 ‘퍼스널 모빌리티’ 시장은 2017년의 8만대 수준에서 2022년엔 20만~30만대의 규모로 증가할 전망이다. 하지만, 전동킥보드에 BMS가 설치되어 과충전, 과방전, 과전압, 과전류보호 등과 같은 보호기능을 수행함에도 불구하고, 전동킥보드에서 발생한 화재사고 건수는 2018년에 5건, 2019년에 10건, 2020년에 39건으로 매년 기하급수적으로 늘어나는 추세이고, 그중 대부분 화재사고는 충전 또는 휴지기간 중 전동킥보드에 설치된 리튬이온배터리에서 발생한 것이다. 특히, 공유형 전동킥보드의 경우, 사용 패턴이 일정하지 않고, 운전성향이 다른 다수의 사용자가 공유하는 특성으로 인해 배터리의 노화 및 셀간 전압차가 개인용보다 더 많이 발생되어, 화재사고에 더 쉽게 노출될 수 있으므로, 이에 대한 대응책이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 공유형 전동킥보드의 안전성을 향상하기 위하여, 충전 또는 휴지기간 중 여러 개의 전동킥보드 배터리에 대한 감시 및 보호기능을 수행하는 BSMS를 제안한다. 여기서, BSMS는 리튬이온배터리 셀간 전압 차이가 감지될 경우, 셀밸런싱

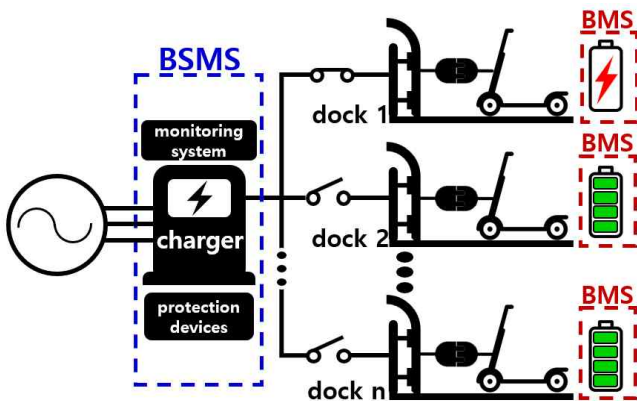
알고리즘을 통하여 셀간 전압차를 제조사에서 제공하는 셀간 허용전압차 이내로 감소시킴으로써, 전압이 낮은 셀이 과충전 되는 것을 방지한다. 또한, BSMS의 오프가스 검출 알고리즘은 외기로부터 유입된 유사오프가스로부터 리튬이온배터리에서 발생하는 오프가스를 정확하게 분별하고, 오프가스가 검출되었을 경우, 오프가스 검출 시 충전회로를 즉시 차단하여 열폭주가 발생하는 것을 방지한다. 한편, 본 논문에서는 상기의 알고리즘을 바탕으로 하드웨어 및 소프트웨어 시스템으로 구성된 BSMS 장치를 구현하고 운용특성을 평가하여, 제안한 공유형 전동킥보드용 BSMS가 배터리를 효과적으로 보호할 수 있음을 확인한다.

2. 공유형 전동킥보드용 BSMS 운용알고리즘

2.1 BSMS의 개념

일반적으로, 전동킥보드는 구조특성상 배터리 보호장치를 설치할 수 있는 공간이 매우 제한적이고, 본체에 고성능의 배터리 보호시스템을 적용할 경우, 생산단가가 상승하는 문제가

발생할 수 있다. 이러한 공간적 및 비용적 문제를 해결하고 전동킥보드 배터리에 대한 다방면의 보호기능을 제공하기 위하여, 본 논문에서는 그림 1과 같이 BSMS를 공유형 전동킥보드용 도킹스테이션에 설치하여, 충전 또는 휴지기간 중 여러 개의 전동킥보드 배터리를 동시에 감시 및 보호하고, 각 전동킥보드에 설치된 기존의 BMS는 운행 중 배터리에 대한 보호기능을 수행한다. 구체적으로, 공유형 전동킥보드용 도킹스테이션에 설치된 BSMS는 셀밸런싱 알고리즘 및 오프가스 검출 알고리즘을 통하여 배터리를 보호하여, 화재가 발생하는 것을 미연에 방지하고, 전동킥보드 본체에 설치된 기존의 BMS는 운행 중 과방전 및 과전류 방지기능을 수행한다.



[그림 1] 공유형 전동킥보드용 BSMS의 개념도

2.2 BSMS의 운용 알고리즘

2.2.1 셀밸런싱 알고리즘

전동킥보드를 장시간 사용할 경우, 리튬이온전지 셀들의 열화속도가 일률적이지 않으므로, 셀 사이에서 단자전압 및 용량 차가 발생할 수 있다. 그중에서 열화가 많이 진행되어 큰 편차의 전압저하가 발생한 셀은 과충전되어 화재의 원인이 될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서 제안한 BSMS는 다음과 같은 셀밸런싱 알고리즘을 통해 셀간 전압차를 허용범위 이내로 감소시킨다.

[Step 1] 전동킥보드용 리튬이온배터리를 구성하는 각 셀들에 대한 번호를 n 번까지 지정하고, 측정된 최소 전압 V_{min} 을 셀밸런싱 기준전압으로 상정한다.

[Step 2] n 번 셀의 단자전압 $V_{cell,n}$ 과 V_{min} 의 차 ΔV_n 을 구하여, 배터리 제조사에서 제공하는 셀간 허용전압차 V_{allow} 과 비교한다. 여기서, ΔV_n 이 V_{allow} 보다 작은 경우, 다음 셀에 대한 [Step 2] 과정을 반복하고, ΔV_n 이 V_{allow} 보다 큰 경우, 셀밸런싱에 필요한 방전용량 Q_{CB} 를 식 (1)에 따라 산정한다.

$$Q_{CB} = \frac{Q_{manu}(Ah) \cdot \Delta V_n}{3600 \cdot V_{cell,n}} \quad (1)$$

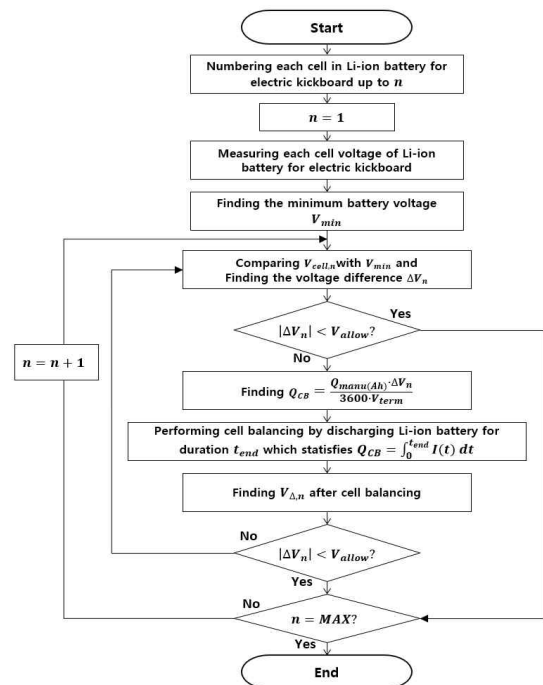
여기서, C_{cell} : 리튬이온배터리 셀의 커패시턴스, k : ΔV_n 과 V_{allow} 의 비, V_{allow} : 배터리 제조사에서 제공하는 셀간 허용전압차

[Step 3] 셀밸런싱을 시작 후, n 번 셀에서 t 시간 동안 방전된 용량 Q_{dis} 는 초 단위로 측정된 전류 $I(t)$ 를 적분법으로 계산한다. 여기서, Q_{dis} 값이 Q_{CB} 에 이르는 경우, 해당 셀에 대한 셀밸런싱을 종료한다.

[Step 4] 셀밸런싱을 수행한 n 번 셀의 전압을 다시 측정하여 V_{min} 과 비교하여 ΔV_n 을 구하고, ΔV_n 값이 V_{allow} 보다 큰 경우, [Step 3]에 돌아가 n 번 셀에 대한 셀밸런싱을 다시 수행한다.

[Step 5] 산정한 ΔV_n 값이 V_{allow} 보다 작은 경우, 다음 셀에 대한 [Step 3]으로부터 [Step 5]까지의 셀밸런싱 과정을 반복하고, n 이 MAX값에 도달하면 전동킥보드용 리튬이온배터리에 대한 전체 셀밸런싱을 종료한다.

상기의 전동킥보드용 리튬이온배터리에 대한 셀밸런싱 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] BSMS의 셀밸런싱 알고리즘

2.2.2 오프가스 검출 알고리즘

충전 중, 리튬이온배터리가 지속적인 전기적 스트레스에 노출될 경우, 셀 내부온도의 상승으로 인하여 전해질이 기화되어 발생하는 오프가스는 리튬이온배터리 화재의 전조현상으로 알려져 있다. 이러한 오프가스를 신속하고 정확하게 감지하여 충전을 중단하여 열폭주로 이어지는 것을 막는 것이 매우 중요한데, BSMS가 외부에서 유입된 유사 오프가스를 감지하여 오작

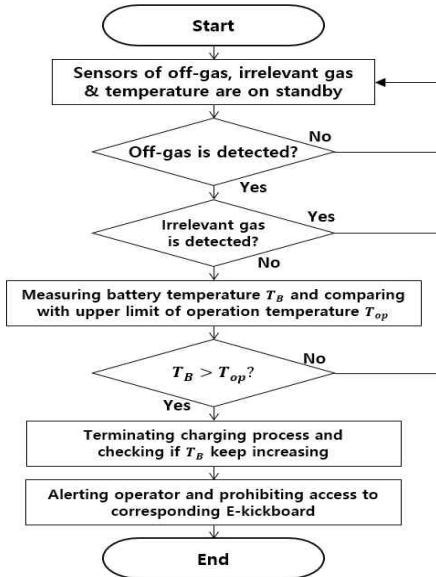
동을 일으킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 오프가스가 감지될 경우, 다음과 같은 오프가스 검출 알고리즘을 통하여 리튬이온배터리에서 발생한 오프가스를 정확히 식별하고 충전회로를 차단하여 화재사고가 발생하는 것을 방지한다.

[Step 1] 오프가스 센서, 유사오프가스 센서 및 온도센서를 스탠바이 모드에 있을 경우, 오프가스가 감지되지 않으면 다시 스탠바이 모드로 돌아가고, 오프가스가 감지되면 검출된 오프가스가 외기로부터 들어온 유사 오프가스인지를 확인한다.

[Step 2] 검출된 오프가스가 유사 오프가스로 식별될 경우, 스탠바이 모드로 돌아가고, 리튬이온배터리에서 발생한 오프가스로 식별될 경우, 리튬이온배터리 셀의 온도 T_B 를 측정하여 배터리 제조사에서 제공하는 동작전압 상한치 T_{op} 와 비교하여, 리튬이온배터리 내부가 과열되고 있는지를 확인한다.

[Step 3] 셀 온도가 T_{op} 보다 높을 경우, 오프가스가 발생한 것으로 판단하고, 충전회로를 차단한다. 또한, 관리자에게 오프가스 검출을 알리고 해당 공유형 전동킥보드의 사용을 금지한다.

상기의 전동킥보드용 리튬이온배터리에 대한 오프가스 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 3과 같다.



[그림 3] BSMS의 오프가스 검출 알고리즘

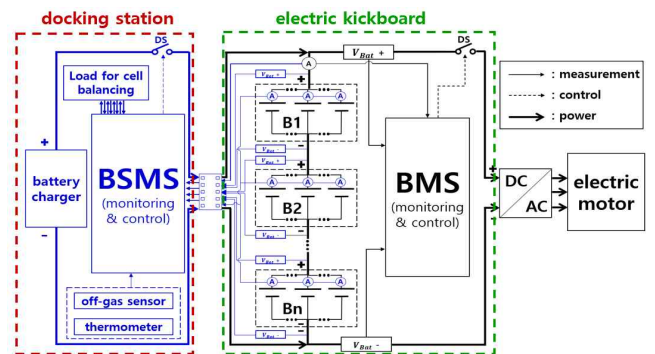
3. 공유형 전동킥보드용 BSMS 장치의 구현

상기의 BSMS 운용알고리즘을 바탕으로, 본 논문은 공유형 전동킥보드용 BSMS 장치를 감시제어부, 센서부, 충전부, 셀 밸런싱부 및 커넥터로 구성된 하드웨어 시스템 및 Autobase

S/W로 구현한 소프트웨어 시스템으로 구성하여, 제안한 알고리즘의 유용성을 평가한다.

3.1 하드웨어 시스템 구현

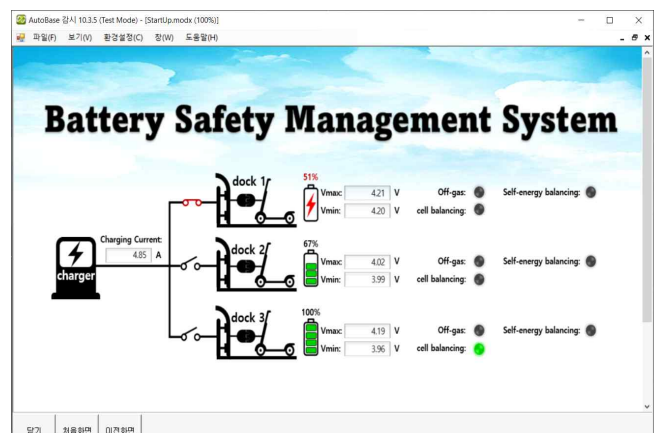
공유형 전동킥보드용 BSMS 장치의 하드웨어 시스템은 그림 4와 같이 BSMS부, 센서부, 충전부 및 셀밸런싱부로 구성된다. 여기서, BSMS부는 센서부로부터 측정된 전압, 전류, 온도 및 오프가스 데이터를 바탕으로 전동킥보드용 리튬이온배터리에 대한 보호기능을 수행하고, 충전부는 BSMS의 제어에 따라 충전기능을 수행한다. 또한, 셀간 전압차가 감지될 경우, BSMS는 셀밸런싱부를 통하여 셀간 전압차를 허용범위 이내로 감소시킨다.



[그림 4] BSMS 장치의 하드웨어 시스템 구성

3.2 소프트웨어 시스템 구현

리튬이온배터리에 대한 감시제어 기능을 수행하기 위하여, 본 논문은 공유형 전동킥보드용 BSMS의 소프트웨어 시스템을 그림 5와 같이 Autobase S/W를 이용하여 구현한다. 구체적으로, 소프트웨어 시스템은 각 공유형 전동킥보드의 충전상태 및 리튬이온배터리 셀의 최고, 최저전압을 표시하고, 오프가스 또는 셀프에너지 밸런싱이 발생할 경우, 또는 셀프에너지 밸런싱을 수행할 경우 경고등을 통하여 관리자에게 알려준다.



[그림 5] BSMS 장치의 소프트웨어 시스템 구성

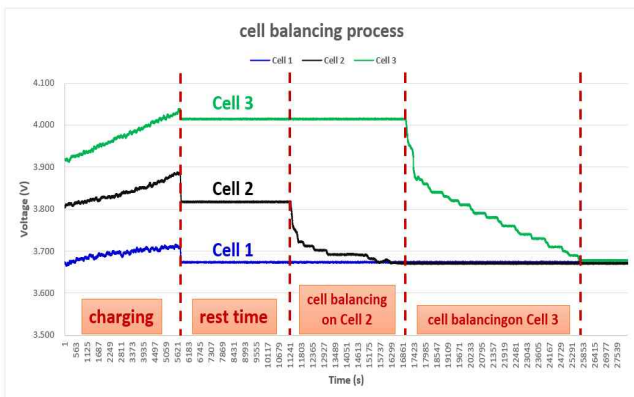
4. 시험결과 및 분석

4.1 시험 조건

제안한 BSMS 운용 알고리즘을 바탕으로 구현한 BSMS 장치의 성능을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 18개월 동안 1030[km]를 주행한 전동킥보드를 대상으로 BSMS 장치의 운용특성을 분석한다. 여기서, 5병렬, 10직렬로 구성된 전동킥보드의 리튬이온배터리 셀의 용량은 208[mAh]이고, 정격전압은 4.2V이며, 그 중 전압불평형이 발생한 3개의 리튬이온배터리 셀을 선정하여, BSMS가 셀밸런싱 알고리즘에 따라 최저전압의 배터리를 기준으로 기타 셀들에 대한 셀밸런싱 기능을 평가한다. 한편, 오프가스 검출시험을 수행하기 위하여, 오프가스는 전해질 성분이 증발되어 형성한 기체로 모의하고, 리튬이온전지의 동작 상한온도를 35℃로 상정하여, 리튬이온배터리의 열폭주 전조증상에 대한 BSMS의 보호기능을 평가한다.

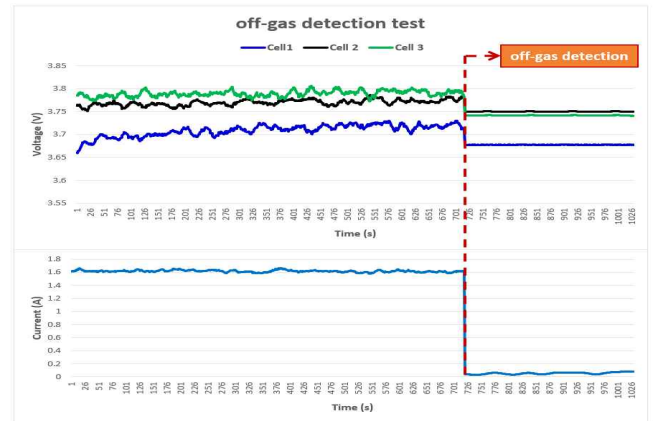
4.2 BSMS의 운용특성

상기의 시험조건을 바탕으로, 본 논문에서 제안한 셀밸런싱 알고리즘에 대한 성능평가를 수행하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 충전완료 후 3개의 리튬이온배터리 셀 중, 전압이 제일 낮은 Cell 1의 전압 3.675V를 셀밸런싱 기준전압으로 상정한다. Cell 2의 경우, 휴지기간에서의 전압이 3.816[V]로 측정되어 기준전압과의 편차 0.141V가 발생한다. 따라서, 상기의 셀밸런싱 알고리즘을 바탕으로 셀밸런싱을 수행한 결과, Cell 2의 전압은 3.672V, 기준전압과의 편차는 0.003V로 감소함을 알 수 있다. 한편, Cell 3의 경우, 휴지기간의 전압이 4.014[V]로 측정되어 기준전압과의 편차 0.339V가 발생한다. 따라서, 상기의 셀밸런싱 알고리즘을 바탕으로 셀밸런싱을 수행한 결과, Cell 3의 전압은 3.679V, 기준전압과의 편차는 0.004V로 감소하므로, 본 논문에서 제안한 셀밸런싱 알고리즘이 유용함을 알 수 있다.



[그림 6] 셀밸런싱 시험결과

또한, 리튬이온배터리의 전해액 성분을 충전 중에 있는 전동킥보드용 리튬이온배터리 근처에 노출시킨 결과, 그림 7과 같이 3개 셀의 전압은 오프가스의 감지에 따라 즉시 개방전압으로 나타나고, 전동킥보드용 리튬이온배터리의 충전전류는 1.6A에서 0A로 감소하므로, 본 논문에서 제안한 BSMS가 오프가스를 정확하게 검출하여 충전회로를 효과적으로 차단하는 것을 알 수 있다.



[그림 8] 오프가스 검출시험 결과

5. 결 론

본 논문에서는 제안한 공유형 전동킥보드용 BSMS의 유용성을 확인하기 위하여, 셀밸런싱 알고리즘 및 오프가스 검출 알고리즘으로 구성된 BSMS 운용 알고리즘을 바탕으로 구현한 BSMS장치의 배터리 보호기능을 운용특성 시험을 통하여 평가한다. 여기서, 셀간 전압차가 발생한 3개의 전동킥보드용 리튬이온배터리 셀에 대한 셀밸런싱을 제안한 알고리즘에 따라 수행한 결과, 최저전압 셀을 기준으로 모든 셀이 허용전압 범위 이내로 감소하는 것을 알 수 있고, 오프가스가 감지될 경우, BSMS가 배터리에서 발생한 오프가스를 정확하게 식별하고 충전회로를 차단하여 화재의 발생을 효과적으로 방지할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 김지명, (2020), “셀프에너지 밸런싱을 고려한 리튬이온전지의 Battery Management System 구현”, 한국산학기술학회 논문지, 21(3), 585-593.
- [2] 장유남, (2014). “스위칭 로스를 고려한 액티브 셀 밸런싱과 패시브 셀 밸런싱의 효율비교”. 대한전기학회 학술대회 논문집, 1013-1014.