

정류된 전압원을 이용한 리튬 이온 배터리용 자동 전하 균일 회로

김문영, 김철호, 김준호, 조신영, 문건우
한국과학기술원 전기전자학과

Automatic Charge Equalization Circuit Based on Regulated Voltage source for Lithium-ion Batteries

Moon-Young Kim, Chol-Ho Kim, Jun-Ho Kim, Shin-Young Cho and Gun-Woo Moon

Dept. of Electrical Engineering & Computer Science - Korea Advanced Institute of Science & Technology 373-1
Guseong-dong, Yuseong-gu Daejeon 305-701, Republic of KOREA

ABSTRACT

직렬로 연결된 리튬 이온 배터리의 안전성을 보장하고 배터리 수명을 늘리기 위해서 셀 전하 균일 회로가 필요하다. 하지만 기존의 전하 균일 회로의 경우 셀 전압을 알아내기 위한 셀 전압 센싱모듈이 필요하게 되고 이는 가격이나 부피적인 측면에서 불리하게 되며, 만약 셀 전압 센싱 모듈을 제거 할 경우 전하 균일 성능이 크게 떨어지게 된다. 본 논문에서는 배터리 팩의 평균전압과 동일한 크기를 가지는 정류된 전압원을 이용한 자동 전하 균일 회로를 제안한다. 제안하는 자동 전하 균일 회로는 양방향 DC/DC 컨버터와 주기적이고 반복적으로 셀 선택을 하는 스위칭 블록을 이용하여 셀 전압 센싱모듈 없이도 우수한 전하 균일을 가능하도록 한다. 그리고 제안된 회로의 동작원리를 설명하고, 8셀 배터리 모듈을 이용한 실험을 통하여 회로의 동작을 검증하였다.

1. 서론

최근 전기자동차 및 하이브리드 전기 자동차의 주요 에너지원으로 높은 에너지 밀도와 낮은 자가 방전율을 가지는 리튬이온 배터리가 사용되고 있다 [1]. 하지만 리튬이온 배터리의 셀 하나당 전압이 약 4V 정도로 낮기 때문에 높은 전압을 요구하는 전기자동차의 전기모터를 동작시키기 위해서 다수의 리튬이온 배터리를 직렬로 연결하여 사용하고 있다 [2]. 그러나 이러한 직렬로 연결된 리튬이온 배터리가 반복적으로 충방전 될 경우, 각 배터리간의 다른 특성으로 인하여 각 배터리간의 잔류 전하량의 불균형이 발생하게 된다 [3]. 이렇게 전하가 불균형적인 상태로 계속 동작하게 되면 배터리 수명이 급격히 감소하게 되고 최악의 경우 폭발로 이어질 수도 있다 [3]. 따라서 이를 방지하기 위해서 전하 균일 회로가 사용되고 있다 [4],[5]. 기존의 전하 균일 회로는 셀 전압의 크기를 얻기 위한 셀 전압 센싱 회로가 존재하여 부피나 가격적인 측면에서 매우 불리하다. 따라서 셀 전압 센싱 회로를 제거한 기존의 자동 전하 균일 회로가 사용될 수 있지만 이 역시 낮은 전하 균일 성능 때문에 큰 용량을 가지는 리튬 이온 배터리에는 적합하지 않다 [6]. 따라서 본 논문에서는 셀 센싱 회로없이 높은 전하 균일 성능을 가지는 정류된 전압원을 이용한 자동 전하 균일 회로를 제안한다. 이는 직렬로 연결된 배터리 팩의 평균전압과 동일한 크기를 가지는 정전압원을 양방향 플라야백 DC/DC 컨버터로 구현하고 이를 각 배터리 셀에 순차적이고 반복적으로 붙여가면서 셀 전압 센싱회로 없이 각 배터리간의 전하 균일을 이루도록 한다.

다음 절에서는 제안된 전하 균일 회로의 동작 원리와 특징을 보이고, 설계시 고려사항 따라 설계된 전하균일 회로를 7Ah의 용량을 가지는 8셀 리튬 이온 배터리팩에 적용하여 제안된 회로의 전하 균일 성능을 검증하였다.

2. 제안하는 전하 균일 회로

2.1 회로 동작 원리

그림 1은 제안하는 자동 전하 균일의 동작 개념도이다. 전체 배터리 팩 전압의 평균전압과 동일한 크기를 가지는 정전압원이 존재하며 이 정전압원을 1번 셀부터 n번 셀까지 순차적이고 주기적으로 연결해주는 스위칭 블록이 존재한다.

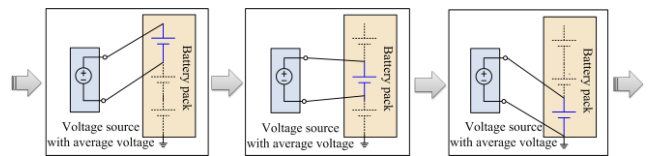


그림 1 제안하는 자동 전하 균일회로의 동작 개념도

이러한 방식을 통하여 정전압원이 특정 배터리 셀에 연결되었을 때 각 배터리 셀의 전압이 평균전압보다 높고 낮음에 따라 평균전압을 따라가기 위해 자동적으로 특정한 충방전 전류를 흘리게 된다. 이러한 수많은 반복적인 스위칭 후에는 모든 배터리 셀의 전압은 셀 전압 센싱 모듈없이 자동적으로 평균전압으로 바뀌게 된다. 이 때 흐르는 전하 균일 전류의 크기는 평균 전압과 셀 전압차이에 의존하여 흐르게 된다. 하지만 리튬이온 특성상 큰 SOC(State of charge) 차이에 비해 수십 mV의 작은 전압 차이를 보이므로 전하 균일 전류가 줄어들게 되어 전하 균일 성능이 떨어지게 된다. 따라서 제안된 자동 전하 균일 회로는 그림 2 (a)와 같이 기준 전압 변조 방식을 사용한다.

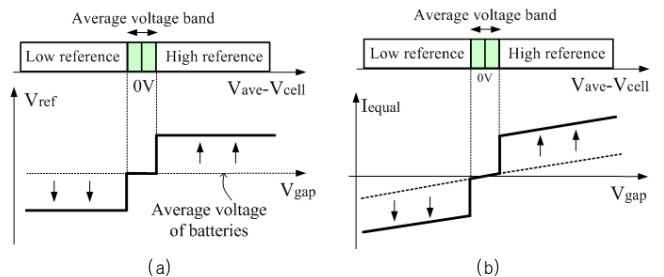


그림 2 (a) 기준 전압 변조 방식, (b) 배터리 전압 차이에 따른 전하 균일 전류

그림 2 (b)의 점선은 기준 전압 변조 방식을 적용하지 않았을 때, 배터리 전압 차이에 따른 전하 균일 전류를 나타내며 실선은 기준 전압 변조 방식을 적용하였을 시 전하 균일 전류를 나타낸다. 전하 균일은 모든 셀의 전압이 설계자가 정한 평균 전압 범위 안에 들어오는 것을 의미한다. 따라서 선택된 셀의 전압이 평균 전압 범위보다 높거나 낮게 되면 DC/DC 컨버터의 출력전압 피드백의 기준 전압을 변경시켜서 더 높거나 낮은 전압을 가지는 정전압원을 만들게 된다. 이를 통하여 정전압원과 각 셀을 순차적으로 붙여나갈 때 선택된 셀의 전압이 평균전압 밴드를 벗어났을 경우 정전압원과 선택된 셀의 전압차이를 더 크게 만들어 큰 전하 균일 전류가 흐르도록 하여 전하 균일 성능을 향상시킨다.

2.2 설계시 고려사항

A. 셀 전하 균일 전류: 일반적으로 전하균일 회로의 전하균일 성능은 전하 균일 전류 크기와 밀접한 관계가 있다. 배터리의 설계 스펙이 주어지게 되면 전하 균일 전류는 다음과 같이 정해진다.

$$i_{equal} = \frac{C \cdot \Delta v_{gap}}{t} - \frac{\Delta v_{gap}}{2R_{tot}} \quad (1)$$

C는 배터리의 커패시턴스를 나타내고 Δv_{gap} 은 전압이 가장 높은 셀과 낮은 셀의 전압차이며, 그리고 t는 설계자 및 사용자가 지정한 예상되는 전하 균일 시간을 의미하며 R_{tot} 은 전하 균일 회로의 출력과 선택된 셀 간의 스위치 및 커패터 저항을 의미한다.

B. 스위칭블록의 스위칭 주기: 선택된 셀이 평균 전압 범위 근처에 있을 때, 스위칭 블록이 각 셀을 선택하는 시간이 길게 되면 셀 전압이 충전전 후에 평균 전압 범위를 벗어나게 된다. 따라서 식 (1)에서 전하 균일 전류가 결정되고, 배터리 사용자가 원하는 평균 전압 범위 (Δv_{band})가 정해지게 되면 다음과 같이 스위칭 블록 최대 스위칭 주기가 결정되게 된다.

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta v_{band}}{i_{equal} - \Delta v_{band}/2R_{tot}} \quad (2)$$

3. 실험결과

제안된 회로의 전하 균일 성능을 검증하기 위하여 7Ah의 용량을 가지는 리튬 이온 배터리 8개 셀에 대한 전하 균일 회로를 그림 3과 같이 제작하였다.

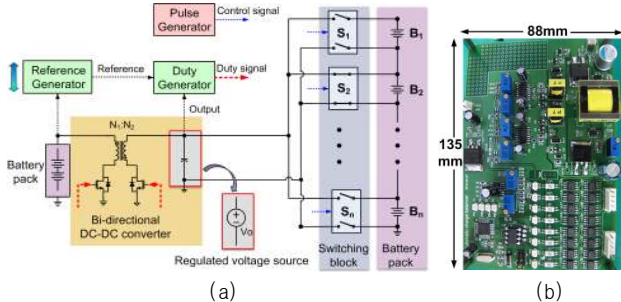


그림 3 (a) 제안된 전하균일 회로 회로도, (b) 제안된 회로 Prototype 사진

그림 3의 prototype회로는 충전전 전류를 제공하기 위한 양방향 플라이백 DC/DC 컨버터와 각 셀을 선택할 스위칭 블록, 그리고 이를 제어하기 위한 제어회로로 이루어져 있다. 제안하는 전하 균일 회로의 전하 균일 성능을 보여주기 위하여 다음과 같은 상황에서 실험을 하였다. 가장 전압이 높은 셀(B_1)의 전압은 3.899V이고 전압이 가장 낮은 셀(B_7)의 전압은 3.8V이며, 그리고 나머지 다른 전압은 평균전압 3.85V의 근처의 전압을 가지고 있다. 따라서 가장 높은 셀과 낮은 셀의 전압차이는 99mV로 약 14.1%의 SOC 차이를 만들었다. 그림 4 (a)는 제안된 회로의 전하 균일 전류를 결정하는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 만약 가장 높은 셀과 낮은 셀의 전압차이가 100mV일 때 30분안에 모든 셀의 전압이 평균 전압 범위($3.85V \pm 5mV$: 전압범위 10mV) 안으로 들어오게 설계를 하였을 때 전하 균일 전류의 크기는 그림 4 (a)와 같이 2A로 결정 된다.

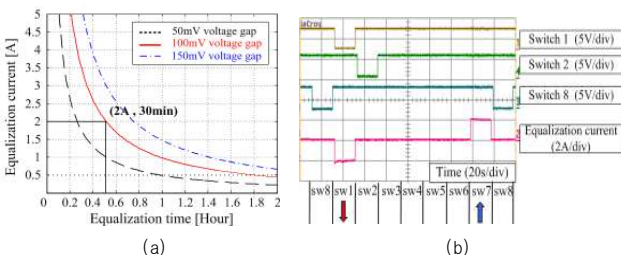


그림 4 (a) 전하 균일 전류 설계, (b) 스위칭 블록 선택 신호 및 전하균일 전류

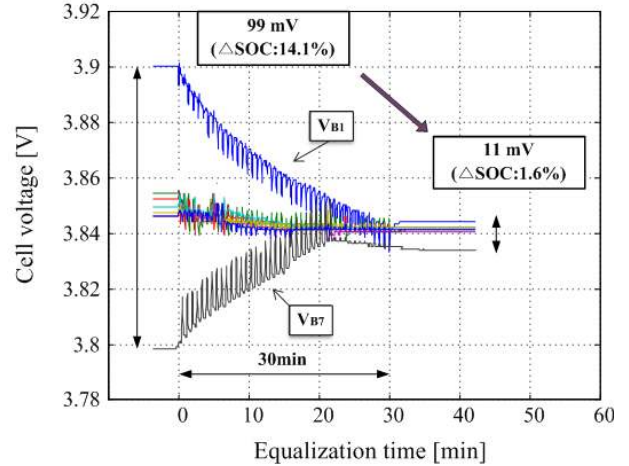


그림 5 제안하는 회로의 전하 균일 성능 실험 결과

그림 4 (b)는 셀 선택 신호 파형 및 양방향 DC/DC 컨버터의 출력 전류 파형을 나타낸다. 각 셀의 스위칭 블록의 스위치는 1번 셀부터 8번 셀까지 순차적이고 주기적으로 켜지게 된다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 자동적으로 가장 낮은 셀 (B_7)의 전압을 충전하기 위해서 2A의 전하 균일 전류가 흐르고 가장 높은 셀 (B_1)의 전압을 작게 만들기 위해서 -2A의 전하 균일 전류가 흐르게 된다.

그림 5는 제안하는 전하 균일회로의 전하 균일 성능을 나타낸다. 약 30분의 전하 균일 동작 후에 시뮬레이션 결과에서 예측한 바와 같이 99mV의 전압 차이($\Delta SOC : 14.1\%$)에서 11mV($\Delta SOC : 1.6\%$)로 줄어들음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 정전압원을 이용한 리튬 이온 배터리용 자동 전하 균일 회로를 제안하고 8셀의 리튬 이온 배터리 팩에 적용하여 전하 균일 성능을 실험하였다. 제안된 전하 균일 회로에서는 정전압원과 각 배터리셀 간의 순차적이고 주기적인 연결을 통하여 모든 배터리의 전압이 평균전압 밴드에 들어올을 확인 할 수 있었다. 더욱이 제안된 회로는 생산 가격을 상승시키는 셀 전압 센싱 회로없이 기준 전압 변조 방식을 이용하여 뛰어난 전하 균일 성능을 가지게 한다. 그러므로 제안하는 자동 전하 균일 회로는 적은 생산 단가를 필요로 하는 직렬로 연결된 리튬이온 배터리 전하 균일회로에 적합하다.

이 논문은 SK 에너지의 연구비지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] M. Inaba and Z. Ogumi, "Up-to-date development of lithium-ion batteries in Japan." IEEE electr. Insul. Mag., vol. 17, pp.6-20, Nov./Dec. 2001.
- [2] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekhara, "power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 55, pp. 2237- 2245, June 2008.
- [3] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," IEEETrans.Ind.Appl.,vol.35,pp.28-35, Feb.1999.
- [4] B. T. Kuhn,, G. E. Pitel, and P. T. Krein, "Electrical properties and equalization of lithium-ion cells in automotive applications" in Proc.2005IEEEVehiclepowerandPropulsionConf.,Chicago,USA, Sep.2005,pp.55-59.
- [5] Y. -S. Lee and M. -W. Cheng, "Intelligent Control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings," IEEETrans.Ind.Electron.,vol.52,pp.1297-1307,oct.2005.
- [6] Y. -S. Lee and G. -T. Cheng, "Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications," IEEETrans.PowerElectron.,vol.21,pp.1213-1224,Sept.2006.