

전기차 리튬이온 배터리를 위한 active-clamp flyback converter 사용한 개별 셀 전하 균일 장치

김철호*, 김문영*, 문건우*,
* 한국과학기술원 (KAIST)

Abstract

최근 전기 자동차 배터리의 전하 균일 장치의 관심이 증가됨에 따라 제어가 간단하며 비교적 적은 소자를 통한 개별 전하 균일 장치 개발의 필요성이 대두되고 있다. 이 논문에서는 직렬 연결된 리튬 이온 배터리를 위한 개별 셀 전하 균일 장치를 제안한다. 이 장치는 하나의 공통된 인버터 동작을 공유하면서 개별로 나뉜 트랜스포머를 간단한 제어 동작을 통해 선택적으로 동작 시키는 방식을 사용한다. 이 구조를 통해 제안하는 전하 균일 장치는 전하 균일 전류를 제어함에 있어 간단한 구조와 제어 방법을 얻을 수 있다. 또한 대용량 배터리를 위한 큰 전하 균일 전류를 얻음에 있어 제안 회로는 신뢰성 있는 적은 수의 회로 소자 수를 가진다. 이 논문에서는 제안하는 장치의 회로와 동작 방법을 설명하면서, 8 개 리튬 이온 배터리를 위한 전하 균일 실험을 통해 제안 장치의 전하 균일 성능을 증명한다.

1. 서론

최근 세계적으로 환경 규제가 심화 됨에 따라 고효율의 에너지 소비 및 청정 에너지를 사용하는 미래형 자동차 개발이 활발하다. 이 중 전기 자동차는 친환경 운송 수단으로 자동차 회사, 정부, 시장에서 큰 관심을 끌고 있다 [1]. 그러나 전기 자동차에서 사용되는 배터리는 수시로 충전과 방전을 수행하게 되고, 이 과정에서 배터리는 열화되거나 특성이 변화 되는 현상이 발생된다. 이와 같은 배터리 열화 또는 특성 변화는 직렬 연결 배터리 간의 배터리 전위 불균형을 만들어 내고, 좀 더 나아가 배터리 전체 구조물의 수명 단축에 크게 영향을 미치게 된다 [2]. 따라서 배터리 간의 전위 균형을 맞추는 별도의 보호 회로가 긴 수명을 가진 배터리 셀을 사용하기 위한 중요한 요인이 된다.

특히 리튬 이온 배터리를 사용하는 제품에서는 배터리의 전위를 균일하게 맞춰주는 전하 균일 회로가 더욱 중요해진다. 리튬 이온 배터리는 그 화학적 특성상 과충전과 과방전 상태를 견디지 못한다. 과충전의 경우 배터리의 폭발 위험을 가지게 되고, 과방전의 경우 배터리 화학적 성분 변화에 의해 수명이 단축되는 단점을 가지고 있다 [2]. 따라서 개별 배터리의 주의 깊은 배터리 전하 균일 회로 및 모니터링 장치가 필수적이다.

개별 셀 전하 균일 장치는 다음에 소개하는 여러 장치들이 연구 되어 있다 [3]. 이들 소개된 여러 회로들은 각 셀마다 개별로 연결된 DC-DC 컨버터를 가지고 있다. 개별 DC-DC 컨버터는 배터리 용량에 따라 달라질 수 있지만, 비교적 작은 용량에 간단한 제어 방법에 의해 구현된다. 하지만 이러한 전하 균일 장치는 전기 자동차나 같이 높은 구동 전압을 필요로 하여 다수의 배터리 셀을 직렬로 연결하는 제품에서는 그 크기와 가격 그리고 수 많은 제어 신호 때문에 사용이 어려워지고 있다. 또한 배터리 용량이 커짐에 따라 DC-DC 컨버터의 용량을 늘려 전하 균일 성능을 늘리기에는 많은 부담이 작용한다.

이를 효과적으로 극복하기 위해, 제안하는 전하 균일 장치는 DC-DC 컨버터 동작을 비교적 간단히 구현하며, 개별 셀 제어 방법을 단순 전류 경로 ON/OFF 방식에 의해 선택적으로 전하 균일 컨버터를 구동하도록 한다.

제안하는 장치는 active-clamp flyback converter를 사용함에 있어 두 스위치로 이루어진 인버터 단을 다수의 트랜스포머에 공통으로 사용하고, 각각 트랜스포머 1차측에 전류 경로를 제어하는 스위치를 구성하여 선택된 배터리에 연결된 DC-DC

컨버터만을 동작 시킨다. 이 구조를 통해 DC-DC 컨버터의 용량이 커지더라도 인버터 단을 공유하기 때문에 DC-DC 컨버터의 구현이 쉽고, 다수에 셀에서 동시에 DC-DC 컨버터 동작이 가능하기 때문에 우수한 전하 균일 성능을 가진다. 이를 통해 제안하는 장치는 다수의 배터리 셀을 사용하는 제품에서도 그 구조가 단순하여, 저가격화와 작은 사이즈에 전하 균일 장치를 만들 수 있다. 또한 개별적인 셀 제어 방식을 통해 우수한 전하 균일 성능을 보여준다.

본 논문에서는 제안하는 장치의 우수성을 검증하기 위해, 8개의 리튬 이온 배터리 셀을 위한 전하 균일 장치의 구현 및 실험을 진행한다. 이 결과를 통해 제안하는 회로가 간단한 제어 방법을 통해 우수한 전하 균일 특성을 나타냄을 증명한다.

2. 제안하는 전하 균일 장치

제안하는 전하 균일 장치는 그림 1에서 보는 것과 같이 공통 인버터단과 셀 선택 스위치 그리고 분리된 트랜스포머 및 다이오드 구성으로 이루어 졌다. 배터리 전체 pack 전압을 통해 선택된 배터리로 에너지를 넘겨주는 구조를 가지며 셀 선택 스위치는 단순 ON/OFF 동작에 의해 전류 경로를 형성한다.

그림 2는 위에서 설명한 내용을 구성한 제안 회로이다. 두개의 스위치와 하나의 capacitor로 이루어진 인버터 단은 active-clamp flyback 동작을 위해 사용된다. 인버터 단은 다수의 트랜스포머 일차 측을 공유하며 병렬로 구성되어 있다. 이 때 트랜스포머 일차측 전류 경로에 셀 선택 스위치를 구성하여, 선택된 스위치에서만 일차측 전류 경로가 형성되어 DC-DC 컨버터 동작을 이루게 된다.

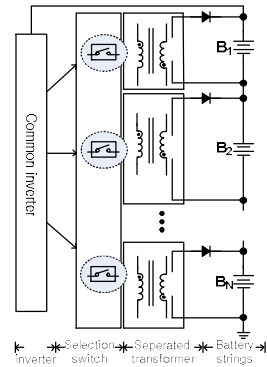


그림 1 제안하는 전하 균일 장치의 블록 다이어그램

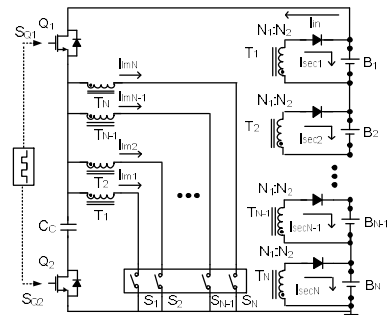


그림 2 제안하는 Active-clamp flyback을 이용한 개별 셀 전하 균일 장치

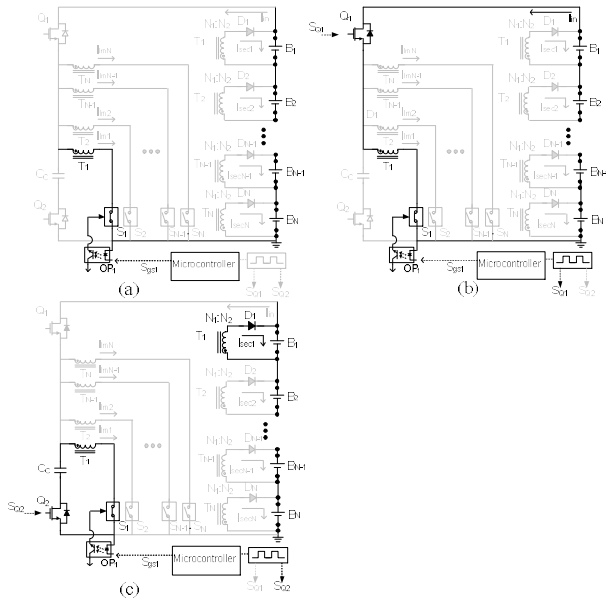


그림 3 제안하는 회로의 기본 동작 과정
(a) Mode 1 (b) Mode 2 (c) Mode 3

제안하는 회로의 동작 과정을 좀 더 쉽게 설명하기 위해 그림 3을 통해 나타내면 다음 3가지 모드와 같다. 이 때 N개 배터리 중 1번째 배터리, B_1 , 이 저충전 된 상태를 가정하였다.

- Mode 1: 처음 단계는 배터리 스트링 중 특정 배터리 1번째 배터리, B_1 , 이 중앙 제어기 (microcontroller) 를 통해 선택 된다. 이 때 중앙 제어기는 opto-coupler 에 단순 ON 신호를 내보내며, 선택된 스위치는 동작이 끝날 때까지 ON 상태를 유지한다. 이로써 선택된 셀의 트랜스포머 일차 측 전류 경로가 형성 된다.

- Mode 2: 앞서 단계에서 선택 스위치가 온전히 켜지게 되면, 공통 인버터의 상단 스위치가 PWM (pulse width modulation) 동작을 하게 된다. 이 때 중앙 제어기는 상단 스위치에 PWM 신호를 제공하고, 전체 배터리 전압으로 인하여 선택된 트랜스포머의 일차 측에 전류가 build-up 된다. 이는 기존 active-clamp flyback converter 동작과 동일하다.

- Mode 3: 마지막 단계는 active-clamp flyback converter에서 트랜스포머 이차 측 rectifier 측으로 전류를 넘겨주는 단계이다. 이 때 인버터 상단의 스위치가 꺼지고 하단의 스위치가 PWM 동작을 시작한다. 이 단계에서 트랜스포머 이차 측으로 넘어가는 전류가 전하 균일 동작에 사용 된다.

위 단계에서 Active-clamp converter의 자세한 동작은 생략하였다.

3. 실험 결과

제안하는 회로의 전하 균일 동작과 성능을 검증하기 위해 전기 차 대용량 15.5Ah 리튬 이온 배터리 8개 셀에 대한 전하 균일 회로를 개발하였다. 그림 4 는 8개 셀에 대한 전하 균일 회로를 나타낸 것이며, 공통으로 사용된 인버터 (2개의 power MOSFET, 1개의 clamp capacitor)와 8개의 양방향 셀 스위치 블록, 8개의 트랜스포머, rectifier diode로 구성되어 있다. 이 회로는 중앙 제어기의 PWM에 의해 인버터가 동작을 수행하며, 셀 스위치의 구동은 중앙 제어기와 opto-coupler 사이의 ON/OFF 신호에 의해 제어 된다. 이 때 중앙 제어기는 8개의 ADC (Analog to Digital converter)를 가지고 셀 전압을 측정하여 이를 통해 전하 균일 제어를 담당한다.

그림 5 (a)는 제안 회로의 전하 균일 성능을 시험하기 앞서 전하 균일 전류와 시간 관계 그래프를 도시하였다. 이 그래프를 통해 사용자가 원하는 전하 균일 시간에 맞춰 전하 균일 컨버터의 출력 전류 양을 디자인 할 수 있다. 이번 실험은 2A 전하 균일 전류를 선택하여 22 분 전하 균일 시간 동안 동작하도록 설계하였다. 그림 5 (b) 실험 회로에서 Active-clamp flyback 동작을 나타낸 주요 동작 파형이다. 그림 5 (c) 는 제안 회로를 통해 8개의 배터리 셀 전하 균일 성능을 보여주는 그래프이다. 특성 셀 배터리 3번이 저충전 되었으므로 3번 셀이

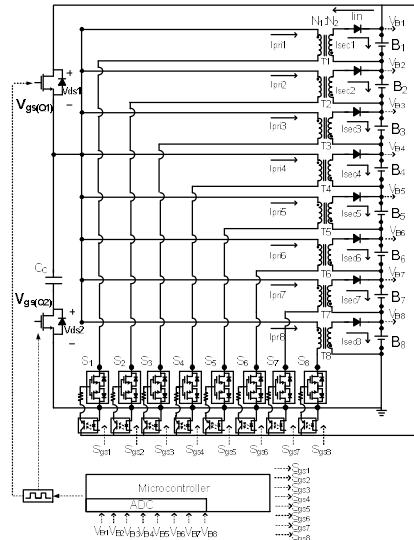


그림 4 8개 리튬 이온 배터리에 대한 prototype 회로

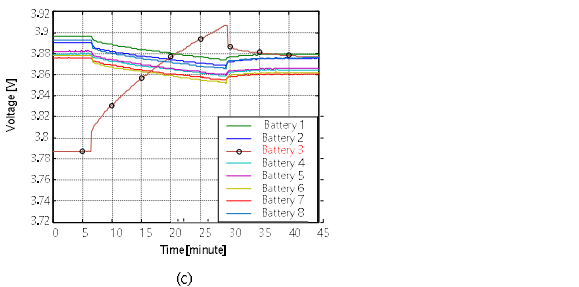
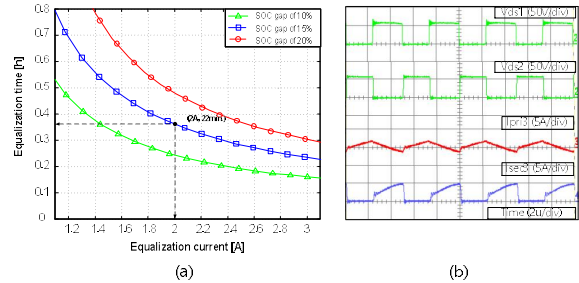


그림 5 (a) 전하 균일 시간과 전류에 관한 simulation 그래프 (b) Active-clamp flyback converter 동작 파형 (c) 8 셀을 위한 전하 균일 성능 실험 결과

선택되어 22분 동안 전하 균일 동작을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 저충전 된 셀이 정상 셀과 동일 전압 레벨로 전하 균일 됨을 알 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 대용량 배터리 셀의 전하 균일을 이루기 위한 개별 셀 전하 균일 장치를 설명하였다. 제안하는 장치는 공통의 인버터와 셀 선택 스위치를 사용하여 전하 균일 성능은 개별 셀에 전하 균일 컨버터가 각각 연결 된 것과 같은 우수한 성능을 가진다. 따라서 제안하는 전하 균일 장치는 전기 자동차와 같이 대용량의 리튬 이온 배터리를 다수 사용하는 제품에서 유용하게 사용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] A Emadi, Y J Lee, and K Rajashekara, "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
- [2] Y -S Lee and M -W Cheng, "Intelligent Control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 52, pp 1297-1307, oct 2005
- [3] Y -S Lee and G -T Cheng, "Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol 21, pp 1213-1224, Sept 2006