

직렬형 리튬이온 배터리의 선택적 전압 균일화 기법을 이용한 새로운 능동형 셀 밸런싱 회로

박영화, 최시영, 최영준, 김래영†
한양대학교

A Novel Active Cell Balancing Circuit using Selective Boost Technique for Series-Connected Lithium-Ion Battery

Young-Hwa Park, See-Young Choi, Yeong-Jun Choi, and Rae-Young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 선택적 전압 균일화 기법을 이용하여 직렬 연결된 리튬 이온 배터리의 빠른 전압 균일화를 위한 새로운 능동형 셀 밸런싱 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 다권선 변압기를 사용한 전하 균일화 회로에 인덕터 1개, MOSFET 스위치 1개를 추가한 회로 구성을 가지며, 기존의 빠른 밸런싱을 위한 회로 대비 수 배 적은 소자로 구성이 가능하다. 추가된 인덕터는 직렬 연결된 배터리 전압을 통해 빠르게 저장된 에너지를, 낮은 전압의 배터리로 높은 밸런싱 전류를 전달함으로써 배터리 셀 간의 빠른 전압 밸런싱을 구현하였다. 제안한 회로의 밸런싱 속도에 대한 검증은 위해서, PSIM Simulation을 통해 기존 회로와 비교 검증 하였다.

1. 서론

최근 급격한 시장 성장세를 보이고 있는 전기자동차, 전기 자전거 분야를 비롯하여 새롭게 성장하고 있는 전기항공기 산업에서, 주행거리 및 항속거리 향상을 위한 배터리 관리 시스템 (Battery Management System) 기술은 가장 중요한 부분 중 하나로 주목 받고 있다. 전기자동차 및 전기항공기와 같은 어플리케이션은 모터 구동 및 각종 전장품 동작을 위한 높은 전압과 용량을 갖추기 위해서, 많게는 모듈 당 수백 개의 배터리 셀들을 직, 병렬 연결하여 사용하고 있다.

리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 비메모리 효과(No Memory Effect), 긴 수명 주기를 갖는 등의 장점을 갖고 있어, 전기자동차 또는 Energy Storage System (ESS)와 같은 어플리케이션에 매우 적합하다. 또한 화학에너지를 사용하는 장치이므로 태생적으로 완전히 같은 특성을 가질 수 없으며, 반복되는 충, 방전 사이클 동안 각각의 배터리 셀들은 State of Charge (SOC) 불균일 현상이 나타나게 된다. 이러한 현상으로 인해 전체 가용용량을 제한하게 되므로 배터리 가용 용량의 향상을 위해서는 SOC 균일화가 필수적이다. SOC의 정확한 측정은 매우 어렵기 때문에 밸런싱 동작은 전압을 기준으로 하게 된다^[1]. 최근 연구에서는 SOC 균일화를 위한 기법으로 열로써 에너지를 소산시키는 Passive Balancing 기법이 아닌 높은 전압의 배터리 셀에서 낮은 전압의 배터리 셀로 전하의 이동을 통해 균일화를 시키는 Active Balancing 기법이 주목 받고 있다. Active Balancing 기법 중 다권선 변압기를 이용한 기존의 회로는 배터리의 전압 차이를 이용하여 배터리 각각의 전압 센싱 없이, 모든 스위치를 동기적으로 턴 온, 오프하는 간단한 제어동작으로 밸런싱이 가능한 장점을 갖는다^[2]. 하지만 배터리의 전압 차이가 작을 경우, 밸런싱 전류의 크기가 작아 밸런싱 속도가 느리다는 단점을 가지며, 이러한 느린 밸런싱

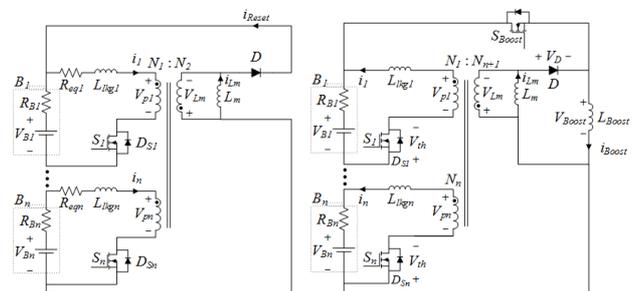
속도는 급속 충전을 어렵게 하는 등의 문제점을 야기하므로 빠른 밸런싱 속도가 요구 된다. 높은 밸런싱 전류값을 얻기 위한 여러 가지 방법 중 하나로 기존 회로에 보조회로를 각 배터리 셀들마다 추가한 회로가 있으나, 추가되는 소자의 수가 많아 시스템 구성 시 크기와 비용을 상승시킨다는 단점을 갖는다^[3]. 전기자동차와 같은 어플리케이션의 경우, 전압 불균일 현상으로 인한 가용용량의 제한은 결국 주행 가능거리를 제한하기 때문에 빠른 밸런싱 기법과 함께, 시스템의 비용 및 부피의 최소화가 요구된다.

본 논문에서는 기존 회로에 대한 단점들을 극복한 새로운 회로를 제안 하였으며, 제안한 회로는 기존 회로에 단 두개의 추가소자로 비용과 부피를 최소화하고, 요구되는 높은 밸런싱 전류값을 얻음으로써 원하는 배터리를 선택적으로 빠른 밸런싱이 가능하도록 설계 되었다.

2. 제안하는 배터리 셀 밸런싱 회로

2.1 회로 구성

그림 1의 (b)는 제안한 회로를 나타내며, 그림 1 (a)와 달리 다권선 변압기를 사용한 기존 회로에 인덕터 1개와 MOSFET 스위치 1개를 추가한 형태를 갖는다. 추가된 인덕터 L_{Boost} 는 빠른 밸런싱을 위한 높은 밸런싱 전류를 얻기 위해 사용되며, MOSFET 스위치 S_{Boost} 는 직렬 연결된 배터리 전체 전압을 인덕터와 연결하는 역할을 한다. 배터리는 각각의 전압 V_{Bn} 과 내부저항 R_{Bn} 을 직렬 연결한 임피던스 기반 전기적 등가모델로 나타내었다. L_{lkgm} 은 변압기의 누설 인덕턴스를 나타내며, MOSFET 스위치 S_n 은 밸런싱이 필요한 평균전압보다 일정 전압만큼 낮은 전압의 배터리에 선택적으로 밸런싱 전류를 공급하기 위한 스위치이다. 2차측의 L_m 은 자화 인덕턴스를 나타내며, 다이오드 D 는 전류의 방향을 제한하기 위해 사용된다.



(a) 기존 회로 (b) 제안한 회로
그림 1 기존 및 제안하는 배터리 셀 밸런싱 회로

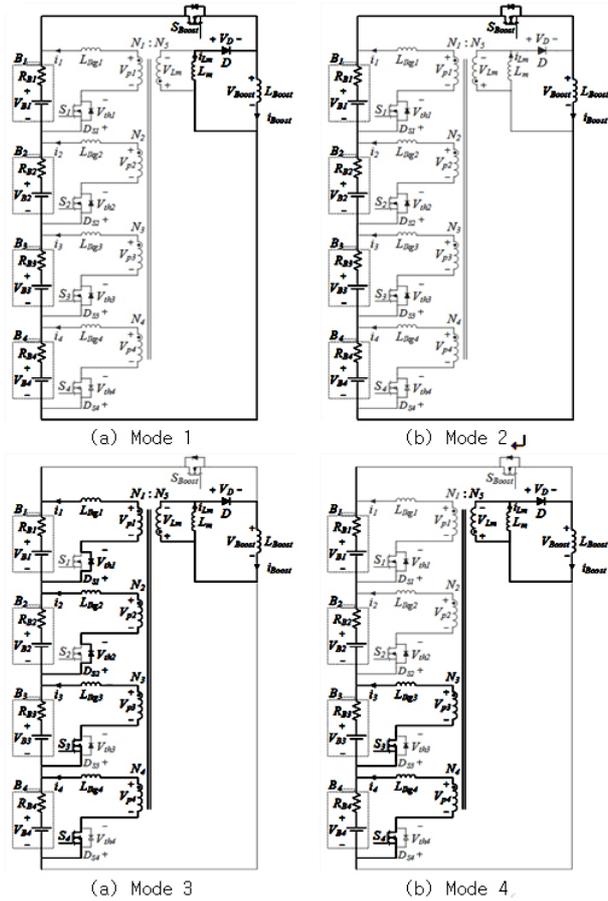


그림 2 제안한 회로의 동작모드

2.2 동작 원리

선택적 전압 균일화 기법은 정상상태에서 그림 2와 같이 4개의 동작 모드를 갖는다. 이때, 4개의 배터리 중 2개의 배터리 B_3, B_4 가 전체 전압의 평균값보다 1mV 이상 작다고 가정하였다. 또한 다권선 변압기는 모든 권선의 턴수비가 같으며, MOSFET 스위치의 역병렬 다이오드 전압은 V_{th} 로 일정하다.

- Mode 1 : Mode 1은 스위치 S_{Boost} 가 턴 온 되면서 시작된다. 이때, 스위치 S_1, S_2, S_3, S_4 는 모두 턴 오프 상태이며, 인덕터에 직렬 연결된 배터리의 전체 전압이 인가되면서 전류 i_{Boost} 는 선형적으로 증가한다.

- Mode 2 : Mode 2는 자화전류 i_{Lm} 이 0에 수렴하면서 시작된다. 이때 배터리 전체 전압이 다이오드 D 에 역방향으로 인가 된다.

- Mode 3 : Mode 3는 스위치 S_{Boost} 가 턴 오프 되면서 시작되며, 이때 인덕터 전류 i_{Boost} 는 선형적으로 감소하기 시작한다. 밸런싱이 필요한 배터리 B_3, B_4 에 직렬 연결된 스위치 S_3, S_4 가 상보적으로 턴 온 되어 밸런싱 전류 i_3, i_4 는 배터리 쪽으로 흐르게 된다. 또한 배터리 B_1, B_2 에 직렬 연결된 스위치 S_1, S_2 의 역병렬 다이오드는 전류원으로 동작하는 인덕터로 인해 도통되므로 전류 i_1, i_2 가 흐르게 되며, V_{B1} 과 V_{th} 전압의 합, V_{B2} 와 V_{th} 전압의 합은 V_p 전압보다 크기 때문에 전류 i_1, i_2 는 감소하며, 배터리 B_3, B_4 의 전압은 V_p 보다 작기 때문에 i_3, i_4 는 증가한다. 그러므로 문턱전압 V_{th} 는 제안한 밸런싱 동작에서 매우 중요한 역할을 하게 된다.

표 1 Simulation 파라미터

Parameters	Value	Parameters	Value
V_{B1}	3.900 [V]	L_{Boost}	162 [μ H]
V_{B2}	3.895 [V]	L_m	100 [μ H]
V_{B3}	3.750 [V]	L_{kgn}	0.59 [μ H]
V_{B4}	3.700 [V]	V_{th}	0.8 [V]
C_{Bn}	8.735 [F]	V_D	0.5 [V]
R_{Bn}	30 [m Ω]	$R_{DS(on)}$	5 [m Ω]

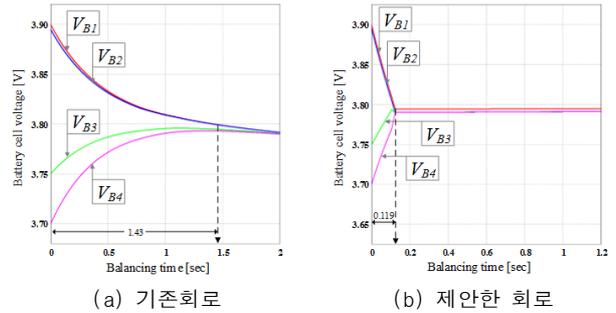


그림 3 Simulation 결과 파형

- Mode 4 : Mode 4는 전류 i_1, i_2 가 0으로 수렴 하면서부터 시작된다. 이때, 인덕터 전류 i_{Boost} 는 전류 i_3, i_4 로 집중되어 흐르기 때문에 배터리 전압 V_{B3}, V_{B4} 의 빠른 상승이 가능하다. 스위치 S_{Boost} 가 다시 턴 온 되면서 동시에 스위치 S_3, S_4 가 턴 오프 되면 동작 모드는 Mode 1으로 바뀌게 되며 스위칭 주기에 맞춰 동작 모드가 반복된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 회로는 PSIM Simulation 9.0버전을 통해 기존 회로인 그림 1의 (a)와 비교 검증하였다. 밸런싱 전류의 최대 피크값은 INR18650-29E 리튬 이온 배터리의 최대 충전전류인 275mA를 고려하여 설계되었다. 표 1은 설계된 회로의 파라미터 값을 나타낸다. 밸런싱 완료 시점은 V_{B3}, V_{B4} 의 전압이 배터리 전체 전압의 평균값과의 차이가 1mV 보다 작아지는 시점으로 가정 하였다. 기존 회로는 그림 3의 (a)와 같이 1.43초의 밸런싱 완료시점을 가지며, 제안한 회로는 그림 3의 (b)와 같이 0.119초의 밸런싱 완료 시점 가진다. 따라서 제안한 회로는 기존 회로보다 약 12배 빠른 밸런싱 속도를 갖는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서 제안하는 선택적 전압 균일화 기법은 다권선 변압기를 사용한 기존 회로에 단 두 개의 소자를 추가하여 높은 밸런싱 전류를 얻음으로써, 기존 회로보다 약 12배 빠른 밸런싱 속도를 구현하였다. 제안한 회로는 배터리 개수가 증가하더라도 추가되는 소자가 없어, 시스템 구성 시 비용과 부피의 최소화가 가능하고 빠른 밸런싱 또한 구현이 가능하다.

참고 문헌

- [1] A. Farmann, W. Waag, A. Marongiu, and D.U. Sauer, "Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles," Journal of Power Sources 281, pp. 114-130, 2015.
- [2] C. S. Lim, K. J. Lee, N. J. Ku, D. S. Hyun, and R. Y. Kim, "A modularized equalization method based on a magnetizing energy for a series-connected lithium-ion battery string," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 4, pp. 1791 - 1799, Apr. 2014.
- [3] D. J. Park, S. Y. Choi, R. Y. Kim, and D. S. Kim, "A novel battery cell balancing circuit using an auxiliary circuit for fast equalization," IEEE IECON, pp.2933-2938, Oct. 2014.