

영전압/영전류 스위칭을 이용한 고효율의 직렬 접속 배터리 전압 밸런싱 방법

김태훈, 박남주, 현동석, 김래영
한양대학교

A High Efficiency Zero Voltage/Zero Current Transition Converter for Series Connected Battery Cell Equalization

Tae-hoon Kim, Nam-Ju Park, Rae-young Kim, Dong-seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

This paper focuses on the zero-voltage/zero current transition voltage equalization circuit for the series connected battery cell. By adding auxiliary resonant cells at the main switching devices such as MOSFET or IGBT, zero current switching is achieved and turned off loss of switching elements is eliminated and by the voltage/second balancing of the inductor, zero voltage switching can be applied to switching element. Transformer coupling between battery cells and ZVZCT (Zero Voltage Zero Current Transition) switching method allow the fast balancing speed and high frequency operation, which reduces the size and weight of the circuit. The validity of the battery equalization is further verified using simulation involving four lithium-ion battery cell models.

1. 서론

최근 전기 자동차(EV), 하이브리드 자동차(HEV), UPS(Uninterrupted Power Supply)등과 같이 대용량의 배터리를 사용하는데 있어 직렬 접속된 배터리 셀이 많이 사용되고 있다. 하지만 다수의 직렬 연결된 배터리 셀을 가지는 배터리 팩의 경우 제조상의 편차, 온도, 사용 조건 등에 따라 각 배터리 셀에 충전된 전압의 편차가 발생하게 되는데 이로 인해 배터리 팩은 단일 배터리 셀을 사용하는 방법에 비해 OV(Over voltage), OT(Over temperature) 등에 의한 높은 시장 불량 가능성을 가진다. 이러한 문제를 해결하고 배터리의 충전량을 최대화하기 위해 개별 배터리 셀의 전압을 균등화 해주는 것이 필요하다. 가장 일반적으로 사용되는 방법은 DC/DC 컨버터를 사용하는 방법으로 각각의 배터리 셀에 스위치를 사용하여 에너지를 전달하는 방식이다. 하지만 이러한 방법은 회로 손실로 인해 배터리의 사용 시간을 저하 할 수 있고 배터리 팩의 크기를 더 크게 만든다는 단점이 있다. 본 논문에서는 변압기를 이용한 배터리의 전압 균등화 회로와 공진 셀을 이용한 무손실 스위칭 방법을 통해 효율을 높이고 스위칭 주파수를 증가시켜 전체적인 회로의 크기를 저감시키는 방법을 제안하였다. 제안한 회로를 검증하기 위해 P-SIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 이에 따른 회로의 동작을 확인하였다.

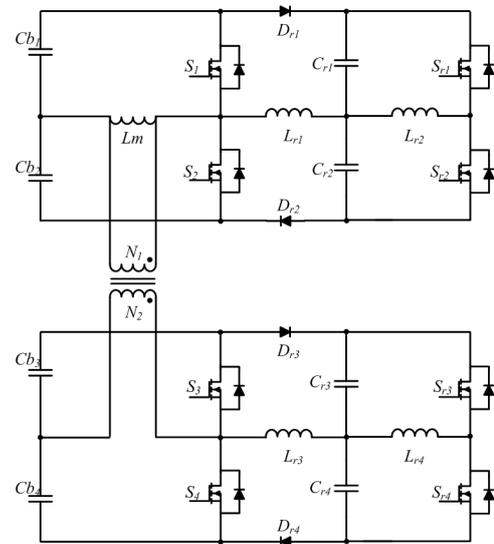


그림 1 제안된 배터리 셀 전압 균등화 회로
Fig. 1 Proposed battery cell equalization circuit

2. 동작 원리

2.1 배터리 셀 전압 균등화 동작 원리

제안된 회로의 기본 동작 원리는 변압기 자화인덕턴스의 Voltage-Second 밸런스와 변압기 커플링을 이용한다. 그림 1은 제안된 배터리 셀 전압 균등화 회로를 나타낸다. 회로 상 배터리는 캐패시터로 모델링되어 있으며 Cb1과 Cb2는 하나의 양방향 벡-부스트 컨버터로 균등화되며 Cb3와 Cb4는 다른 하나의 양방향 벡-부스트 컨버터를 이용한다. 변압기의 권선은 각 홀수번의 배터리셀과 짝수번의 배터리셀을 교번하여 연결시키며 이러한 구조를 통해 홀수번 배터리 셀 사이의 균등화와 짝수번 배터리 셀 사이의 균등화가 이루어짐으로서 전체 배터리 셀 전압이 동일한 전압으로 균등화 된다.

2.2 모드 분석 및 영전압 영전류 스위칭 동작

그림 2와 그림 3은 회로의 전압 전류 파형과 동작 모드를 나타낸다. 주 스위치가 온되면 인덕턴스의 Voltage-Second 밸런스 원리에 따라 영전압 스위칭이 이루어지게 되며 S_{m} , D_{m} , C_m , L_m 을 포함한 공진회로가 주 스위치가 오프되는 순간에 영전류 스위칭을 달성시킨다. 이와 같은 동작모드는 각 스위치 별로 6단계로 이루어져 있으며 이는 다음과 같다.

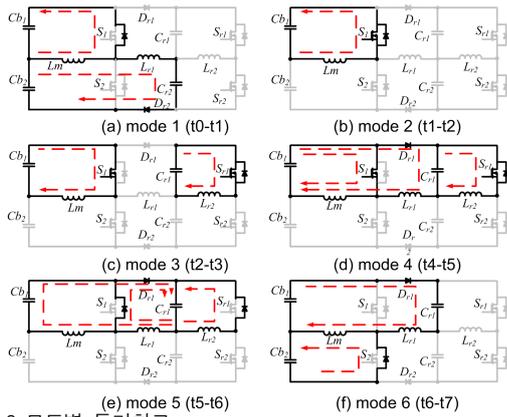


그림 2 모드별 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuits of four topological stages

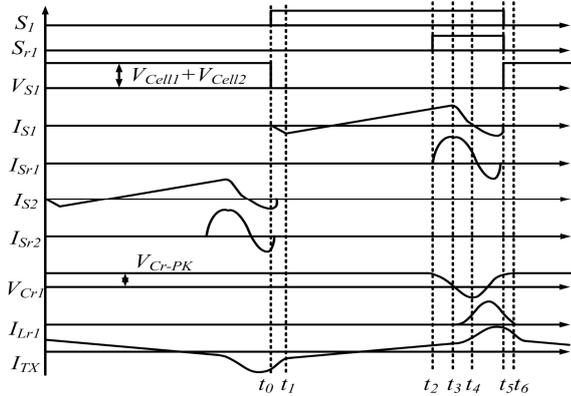


그림 3 구동 파형

Fig. 3 Key waveform of the circuit

모드1은 주스위치 S1의 기생 다이오드가 도통되고 Lr1에 남아있는 공진에너지가 Cr2로 충전된다. 이때 S1의 게이트 신호는 온되고 이로 인해 영전압 스위칭이 일어난다. 모드2는 회로 내의 모든 공진이 끝나고 변압기의 자화인덕턴스로 모든 전류가 흐르는 구간이다. 모드3 구간에서는 Sr1 스위치가 온되고 이로 인해 Cr1과 Lr2간의 공진이 시작된다. 이때 Cr1의 전압과 S1의 전류는 다음과 같다.

$$V_{Cr1}(t) = V_{Cr-pk} \cos(\omega_1(t-t_2)) \quad (1)$$

$$I_{S1}(t) = (V_{Cr-pk}/Z_1) \sin(\omega_1(t-t_2)) \quad (2)$$

$$\text{이때 } \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{r2}C_{r1}}}, Z_1 = \sqrt{\frac{L_{r2}}{C_{r1}}} \text{ 이다}$$

모드4는 Lr2에 흐르는 공진전류가 Lm을 넘어서면서 Lr1으로 전류가 흐르기 시작한다. 이때 Lr1이 공진을 시작하고 이로 인해 공진 주파수가 변화하게 되고 회로 공식은 다음과 같다.

$$V_{Cr1}(t) = \frac{V_{Cr-pk}}{\sqrt{1 + \frac{L_{r2}}{L_{r1}}}} \sin(\omega_2(t-t_3)) \quad (3)$$

$$I_{S1}(t) = I_{LM} - \frac{L_{r2}}{L_{r1} + L_{r2}} \frac{V_{Cr-pk}}{Z_1} (1 - \cos(\omega_2(t-t_3))) \quad (4)$$

$$I_{S1}(t) = \frac{V_{Cr-pk}}{Z_1} - \frac{L_{r2}}{L_{r1} + L_{r2}} \frac{V_{Cr-pk}}{Z_1} (1 - \cos(\omega_2(t-t_3))) \quad (5)$$

$$\text{이때 공진주파수는 } \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{(L_{r2}/L_{r1})C_{r1}}} \text{ 이다.}$$

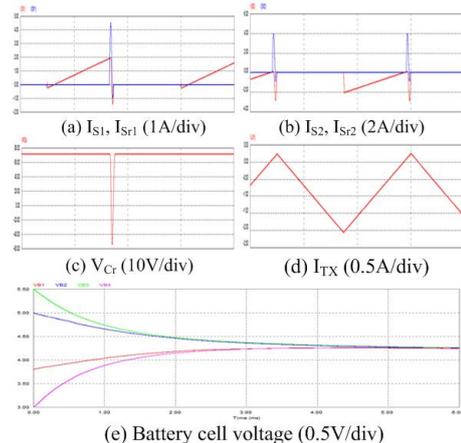


그림 4 시뮬레이션 결과

Fig. 4 The Simulation results

모드 5는 Lr1과 Lr2의 공진 전류로 인해 S1의 기생 다이오드가 도통되기 시작하고 이때 S1과 Sr2가 오프되면서 영전류 스위칭이 달성된다. 모드6은 모드1과 같이 Lr1에 남아있는 공진 전류가 Cr1에 충전된다. 이러한 동작의 반복을 통해 스위치는 지속적으로 무손실 스위칭을 달성하게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 제안된 회로의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 이 중 그림 4 (a)는 주스위치 S1과 공진스위치 Sr1의 전류 파형을 나타내며 두 스위치가 모두 영전압/영전류 스위칭을 하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4 (b) 역시 S2와 Sr2의 전류 파형을 나타내며 (c)는 공진에 따른 Cr1의 전압 파형 나타낸다. 배터리 셀간의 전압 균등화 성능은 그림4 (e)에 나타내었다. 시뮬레이션 상에 배터리 모듈은 10mF의 캐패시터로 모델링 하였으며 스위칭 주파수는 200kHz로 시뮬레이션 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 직렬연결된 배터리 셀을 전압 균등화 회로에 있어서 변압기를 이용하여 Voltage-Second 발란스의 원리와 변압기 커플링을 통해 빠른 속도의 전압 균등화 성능을 달성하였고 각 스위칭 소자들의 무손실 스위칭을 통해 배터리 셀의 에너지 손실을 최소화하는 회로를 제안하고 시뮬레이션을 통해 회로 동작을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Dong-Yun Lee, Min-Kwang Lee, and Dong-Seok Hyun, "New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stress," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 1, pp95-104, Jan. 2003.
- [2] K. Nishijima, H. Sakamoto, K. Harada, "A Magnetic Coupled Simple and High Efficient Battery Management System," in IEEE 1997 Magnetics Conference, 2000, pp. 561.