

빠른 전하 균일화를 위해 보조 회로를 이용한 새로운 셀 밸런싱 회로

박동진, 김래영†
한양대학교

A Novel Cell Balancing Circuit using an Auxiliary Circuit for Fast equalization

Dong jin Park, Rae young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 셀 간의 빠른 전하 균일화를 위한 새로운 셀 밸런싱 회로를 제안한다. 대칭적인 다권선 변압기를 이용하는 밸런싱 회로의 경우 셀들 간의 밸런싱 전류의 크기가 회로 내부 저항 및 변압기의 누설 인덕턴스에 의해 크게 제약 받고, 배터리 셀 간의 밸런싱이 이루어짐에 따라 충방전 전류가 감소한다는 단점이 있다^{[1], [2]}. 본 논문에서는 보조 회로를 이용하여 밸런싱 전류를 부스트 업 시켜 빠르게 셀 간의 전하 밸런싱을 맞추어주는 회로를 제안한다. 이를 통해 회로 내부 저항의 영향을 줄이고 일정한 충방전 전류를 흘려보냄으로 빠르게 셀 전하들의 밸런싱을 맞출 수 있다.

1. 서론

리튬 이온 배터리는 타 이차전지 대비 고 에너지 밀도, 낮은 자가 방전율 등의 특징을 갖는 전기 에너지 저장 장치로 많은 주목을 받고 있다. 특히, 전기 자동차와 같은 고전압 응용 시스템에서는 수많은 배터리 셀을 직렬로 연결하여 구동 전압을 확보하는데, 직렬로 연결된 배터리 셀 각각의 화학적, 전기적 특성이 조금씩 상이하여 각 배터리 셀들 간의 전하 불균일 현상이 발생한다. 이러한 전하 불균일 현상은 충전, 방전 사이클이 반복되는 시점부터 더욱 심화되어 배터리의 수명을 단축시키고, 폭발이나 화재의 위험성을 증가시키므로 반드시 밸런싱 회로를 이용하여 각 배터리 셀들의 전하를 균일하게 맞춰주어야 한다.

대칭적인 다권선 변압기를 이용하는 셀 밸런싱 회로의 경우, 센서 및 복잡한 알고리즘을 사용하지 않아도 배터리 셀 간의 전하를 균일하게 맞출 수 있어 시스템의 크기 및 구현 비용을 크게 줄일 수 있다^{[1], [2]}. 그러나 밸런싱 전류의 크기가 회로 내부 저항 및 누설 인덕턴스에 의해 큰 영향을 받고, 셀들의 전하가 균일화됨에 따라 충방전 전류의 크기가 감소한다.

본 논문에서는 대칭적인 다권선 변압기를 이용한 새로운 셀 밸런싱 회로를 제안한다. 제안한 회로에서 밸런싱 전류는 보조 회로를 이용하여 부스트 업 시킨 후 전달하는 방식을 채택함으로써 빠른 밸런싱을 이룰 수 있다. 이에 회로 내부 저항에 의한 영향 또한 감소함을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

2. 제안한 셀 밸런싱 회로

2.1 시스템의 구성

제안한 셀 밸런싱 회로 및 이의 제어 회로는 그림 1과 같다. N 개의 배터리는 하나의 다권선 변압기(T)에 커플링 되어 있다. 각 주 스위치(S_{m1}) 및 보조 스위치(S_{sn})는 제어회로에 의해 선택적으로 구동되는데, 이는 비교기로 권선의 출력 전압과 배터리 셀 전압을 비교하여 평균전압보다 큰 배터리 측 회로는 주 스위치, 평균전압보다 낮은 배터리 측 회로는 보조 스위치가 일정 시간동안 턴 온 되도록 제어한다.

2.2 동작모드 분석

동작모드 분석을 간략히 하기 위해, 다음과 같은 2개의 가정을 한다.

1) 배터리 스트링은 총 3개의 배터리 셀이 직렬로 연결되어 있고, 각 셀 전압은 $V_{B1} > V_{aver}$ (셀평균전압) $> V_{B2} > V_{B3}$ 라 가정한다.

2) 다권선 변압기는 대칭적으로 설계되어 1차측 권선비는 1:1:..1로 동일하게 설계되었으며, 각 누설 인덕턴스 또한 모두 동일하다. ($L_{k1} = L_{k2} = L_{k3} = L_k$)

그림 2는 각 동작모드에서의 회로도를 보여준다.

Mode 1 ($t_0 - t_1$): t_0 시점에서 제어 회로에 의해 주 스위치 S_{m1} 과 보조 스위치 S_{s2}, S_{s3} 이 턴 온 되며, 과충전 상태인 배터리 1에서는 변압기로 방전 전류 i_1 이 흐른다. 보조 스위치 2, 3이 켜짐으로 인해 보조 회로에는 V_{Tn} 전압이 인가되어 변압기로부터 전류 i_{La2}, i_{La3} 이 흐르며, 이는 보조 인덕터 L_{a2}, L_{a3} 에 자계 형태로 에너지를 축적한다.

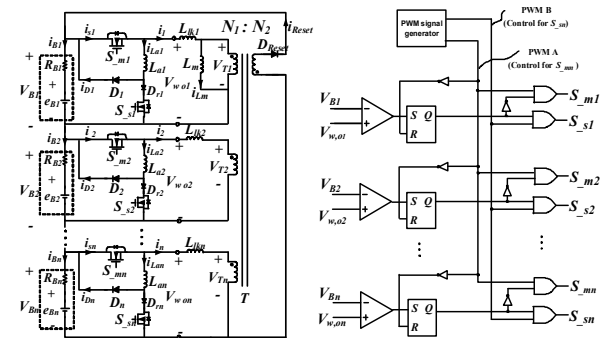


그림 1 제안한 셀 밸런싱 회로 및 제어 회로

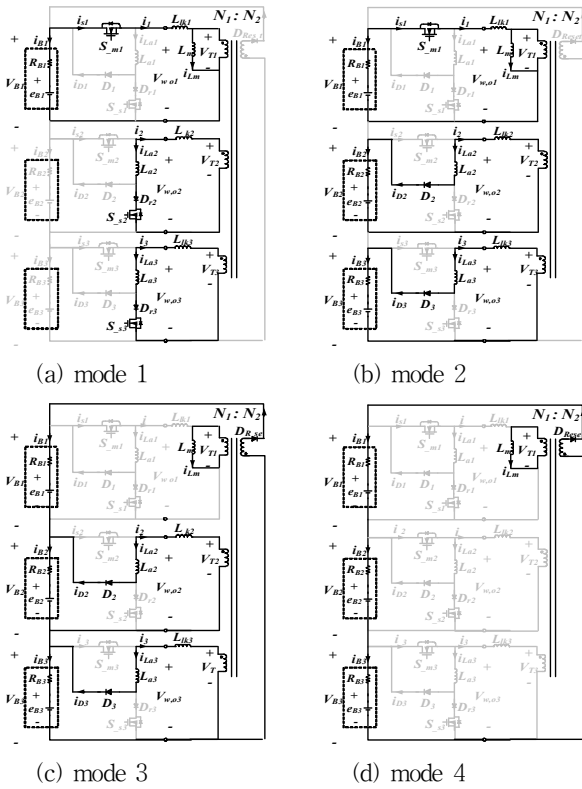


그림 2 제안한 셀 밸런싱 회로의 모드 분석

Mode 2 ($t_1 - t_2$) : t_1 시점에서 보조 스위치 S_{-s2}, S_{-s3} 이 턴 오프 되면, 보조 인덕터를 통해 흐르는 전류 i_{La2}, i_{La3} 는 연속적으로 흐르므로 보조 다이오드 D_2, D_3 가 도통된다. 따라서 보조 인덕터 L_{a2}, L_{a3} 를 통해 흐르던 전류는 저충전된 배터리로 흐르게 된다.

Mode 3 ($t_2 - t_3$) : t_2 시점에서 모든 주 스위치가 턴 오프 되면 자화 인덕터 전류 i_{Lm} 및 보조 인덕터 전류 i_{La2}, i_{La3} 에 의해 2차 측 리셋 다이오드 D_{Reset} 이 도통된다. 변압기의 2차 측 단자에 배터리 스트링 전압이 인가되면, 이는 $-(N_1/N_2)$ 의 권선비가 곱해져 변압기 1차 측 단자에 인가되고, i_{Lm} 및 i_{La2}, i_{La3} 전류는 음의 기울기로 감소하게 된다.

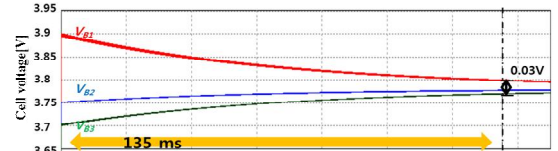
Mode 4 ($t_3 - t_4$) : t_3 시점에서 보조 인덕터 전류 i_{La2}, i_{La3} 는 먼저 0으로 수렴하게 되고, 그 후 자화 인덕터 전류 i_{Lm} 는 일정 시간동안 방전이 지속된다.

3. 시뮬레이션 결과

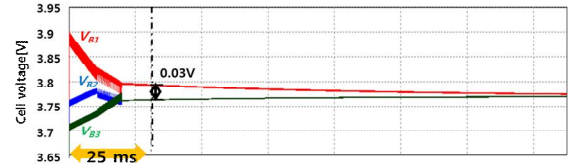
제안한 회로의 타당성을 검증하기 위해 표 1의 조건하에서 PSIM 9.0을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 3. (a)와 (b)는 각각 기존 논문과 본 논문에서 제안한 밸런싱 방법을 이용하였을 때, 셀 전압의 차이가 0.03V까지 감소하는 시간을 보여주며, 이는 본 논문에서 제안한 방법을 이용하는 경우 더 빠른 밸런싱이 가능하다는 사실을 보여준다. 그림 3. (c)는 스위치의 턴 온 저항에 따른 밸런싱 시간을 보여준다. 이는 제안한 회로에서 회로 내부 기생저항에 의한 영향이 기존 방법 대비 작아 비교적 큰 턴 온 저항을 갖는 스위치를 사용하더라도 빠른 전하 균일화가 가능하다는 사실을 보여준다.

표 1 시뮬레이션 파라미터 값

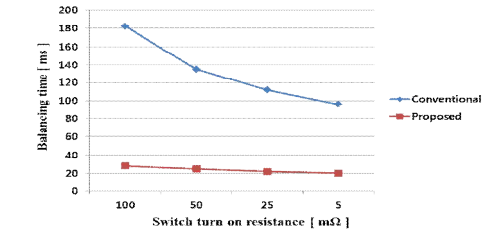
Parameter	Value	
Initial Battery Cell Voltage	V_{B1}	3.9 V
	V_{B2}	3.75 V
	V_{B3}	3.7 V
Switching frequency	f_s	20 kHz
Magnetizing inductance	L_m	1 mH
Leakage inductance	L_k	1 uH
Switch turn on resistance	R_{on}	50 mΩ
Transformer turn ratio	$N_1 : N_2$	1:4



(a) Conventional circuit ($R_{on} = 0.05$)



(b) Proposed circuit ($R_{on} = 0.05$)



(c) Comparison of balancing time

그림 3. 배터리 셀 밸런싱 결과

4. 결론

본 논문에서는 대칭적인 다권선 변압기를 이용한 향상된 셀 밸런싱 회로를 제안하였다. 제안한 방법은 대칭적인 다권선 변압기를 이용하므로 복잡한 알고리즘 없이 스위치를 선택적으로 제어할 수 있으며, 보조 회로를 이용하여 비교적 큰 턴 온 저항을 갖는 스위치를 사용하더라도 밸런싱 속도를 크게 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

[1] C. S. Lim, K. J. Lee, N. J. Ku, D. S. Hyun, R. Y. Kim, "A Modularized Equalization Method based on Magnetizing Energy for a Series connected Lithium Ion Battery String", IEEE Trans. Power Electron, Vol.29, No. 4, pp.1791-1799, April. 2014.

[2] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Charge equalization for an electric vehicle battery system," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 34, No. 1, Jan. 1998, pp. 235-246.