

결합 인덕터를 이용한 능동형 셀 밸런싱 회로의 밸런싱 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 동작 모드

이상중*, 김명호*, 강대욱*, 백주원*, 정지훈**
 한국전기연구원*, 울산과학기술원**

A New Operation Mode to Improve Balancing Speed of Active Cell Balancing Circuits Using Coupled Inductor

Sang-Jung Lee*, Myoung-ho Kim*, Dae-Wook Kang*, Ju-Won Baek*, Jee-Hoon Jung**
 Ulsan National Institute of Science and Technology*, Korea Electrotechnology Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 다중 권선 결합 인덕터를 이용한 능동 셀 밸런싱 회로의 밸런싱 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 동작 모드를 제안한다. 다중 권선 결합 인덕터를 사용한 능동 셀 밸런싱 회로는 두 셀이 하나의 결합 인덕터 권선을 공유하며, 셀과 결합 인덕터 사이의 연결을 제어하기 위해 셀당 하나의 스위치가 사용된다. 이 회로는 비교적 높은 전압을 갖는 소스 셀에 저장된 에너지를 결합 인덕터에 저장한 뒤, 그 에너지를 목표 셀로 전달하는 방식으로 셀 밸런싱을 수행한다. 하지만, 회로 구조상 서로 다른 권선을 공유하고, 동일한 위치에 연결된 셀 간 밸런싱을 수행할 경우, 두 번의 에너지 전달 과정을 통해 목표 셀로 에너지가 전달 되게 된다. 이는 에너지 전달 경로를 증가시키므로 회로의 효율과 셀 밸런싱 속도를 크게 저하시킨다. 본 논문은 위의 셀 조건에서 에너지 전달 경로를 단축시켜 셀 밸런싱 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 동작 모드를 제안한다. 새로운 동작 모드 성능은 15W급 시작품을 이용하여 검증되었다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 납축전지 대비 에너지 밀도가 높고 출력이 우수하여 최근 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)의 새로운 에너지원으로 사용되고 있다. 일반적으로 리튬이온 배터리는 약 3.7 V의 낮은 공칭전압을 갖는다. 따라서 어플리케이션에서 요구하는 전압을 생성하기 위해서 다수의 셀이 직렬로 연결될 필요가 있다. 이상적으로 직렬로 연결된 셀의 초기 잔존 용량이 동일하다면, 충 방전 횟수에 상관없이 모든 셀은 동일한 전압을 갖게 된다. 하지만, 셀 내부의 파라미터 불균형으로 인해 실제로 각 셀은 다른 전압을 갖는다. 이러한 셀 불균형 현상이 발생한 후 충 방전이 반복될 경우, 특정 셀이 과충전 또는 과방전 되어 배터리의 수명 및 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 위의 문제를 해결하기 위해 셀 밸런싱 기술이 제안되었으며, 현재 다양한 셀 밸런싱 기술이 활발히 연구되고 있다. 그림 1은 다중 권선 결합 인덕터를 사용한 셀 밸런싱 회로를 나타내고 있다^[1]. 이 회로는 비교적 높은 전압을 갖는 셀에 저장된 에너지를 결합 인덕터에 저장한 뒤, 그 에너지를 목표 셀로 전달하는 방식으로 셀 밸런싱을 수행한다. 소스 셀과 목표 셀이 인접할 경우 회로는 벡-부스트 모드로 동작하며, 에너지 전달 경로는 그림 1과 같다. 그림 2는 인접하지

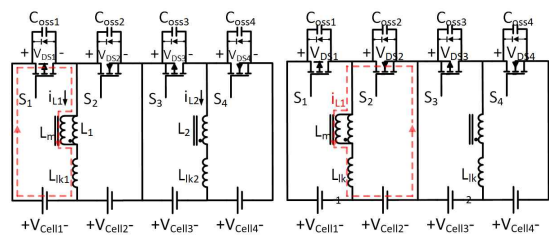


그림 1 벡-부스트 동작 시 전류 경로
 Fig. 1 The current path in buck-boost operation

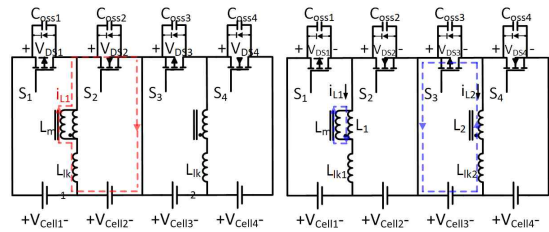


그림 2 플라이백 동작 시 전류 경로
 Fig. 2 The current path in flyback operation

않은 홀수-짝수 셀 간 밸런싱이 수행될 경우의 전류 경로를 나타낸다. 이 경우 이 회로는 플라이백 모드로 동작한다. 위의 밸런싱 조건에서는 단일 동작으로 소스 셀의 에너지를 목표 셀로 전달이 가능하다. 하지만, 기존 방식에서 인접하지 않은 홀수 셀 간 또는 짝수 셀 간 에너지를 전달할 경우, 벡-부스트 그리고 플라이백의 연속적인 동작이 요구된다. 따라서, 다른 밸런싱 조건에 비해 밸런싱 속도 및 회로의 효율이 감소하는 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서는 위의 셀 전압 조건에서도 단일 동작으로 목표 셀로 에너지를 전달할 수 있는 새로운 동작 모드를 제안한다. 제안한 동작을 사용할 경우, 에너지 전달 경로를 크게 단축시켜 밸런싱 속도 및 시스템 효율을 향상시킬 수 있다.

2. 제안한 동작 모드

2.1 동작 설명

그림 3은 제안한 방식의 모드별 전류 경로를 나타내고 있으며, 그림 4는 제안한 동작의 스위칭 및 전류 파형을 나타내고 있다. 여기서 i_{L1} , i_{L2} 는 각 권선에 흐르는 전류는 나타내며, 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀1, 셀3로 가정하여 모드 분석을 진행하였다.

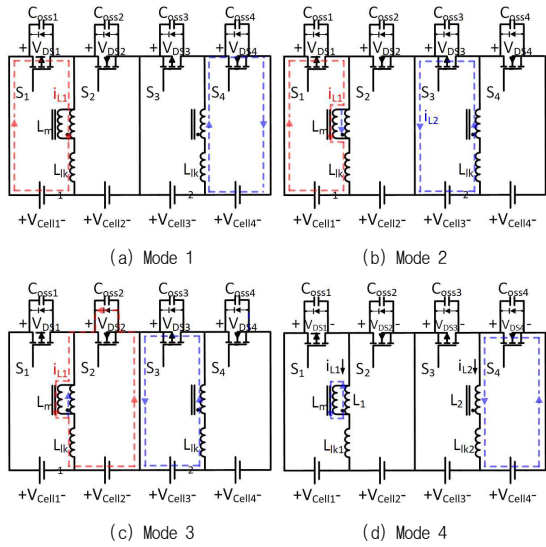


그림 3 제한한 동작 모드에서 전류 경로
 Fig. 3 The current path in proposed operation mode.

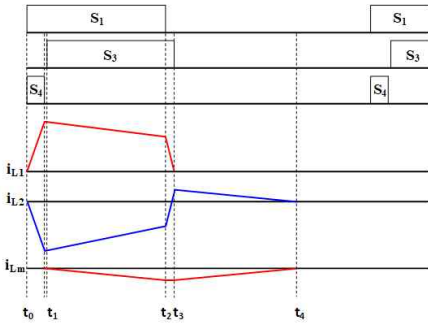


그림 4 제한한 동작 모드의 주요 파형
 Fig. 4 Key waveform in proposed operation mode.

모드 1[t_0-t_1]: S_1 과 S_4 가 동시에 턴-온 되면 모드 1이 시작된다. 두 스위치를 동시에 턴-온 하면, 각 권선에는 반대 극성의 전압이 인가되어 셀 1과 셀 4의 전압은 각 권선의 누설 인덕턴스 L_{lk1} , L_{lk2} 에 인가되게 된다. 따라서 모드 1에서 전류 i_{L1} , i_{L2} 는 큰 기울기를 갖는다. 이때 전류 i_{L2} 는 목표 셀을 충전하는 방향으로 생성되며, S_3 가 턴-오프 되면 모드 1은 종료된다.

모드 2[t_1-t_2]: 암-쇼트를 방지하기 위하여 일정 데드-타임 구간을 가진 후, S_3 를 턴-온 하면 모드 2가 시작된다. 모드 2에서 소스 셀에 저장된 에너지는 결합 인덕터를 통해 목표 셀로 전달되며, 소스 셀의 일부 에너지는 L_m 에 저장된다.

모드 3[t_2-t_3]: S_1 이 턴-오프 되면 모드 3이 시작된다. 모드 3에서 i_{L1} 전류 경로로 인해 소스 셀의 에너지가 비 목표 셀(셀 2)로 전달되게 된다. 해당 구간을 최소화하기 위해, i_{L1} 이 0으로 감소할 때 까지 S_3 를 턴-온 한다. 이때, 각 권선에 반대의 전압 극성이 인가되므로, 짧은 시간 안에 i_{L1} 을 0으로 감소시켜 비 목표 셀로 전달되는 에너지를 최소화 할 수 있다.

모드 4[t_3-t_4]: S_3 가 턴-오프 되면 모드 4가 시작된다. 모드 4에서는 L_m 에 저장된 에너지가 셀4로 전달되어, 모드 1에서 셀4가 방전한 에너지를 보상하게 된다.

3. 실험 결과

그림 5는 소스 셀과 목표 셀이 50 mV의 전압차를 가질 때의 모드별 셀 밸런싱 결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 리

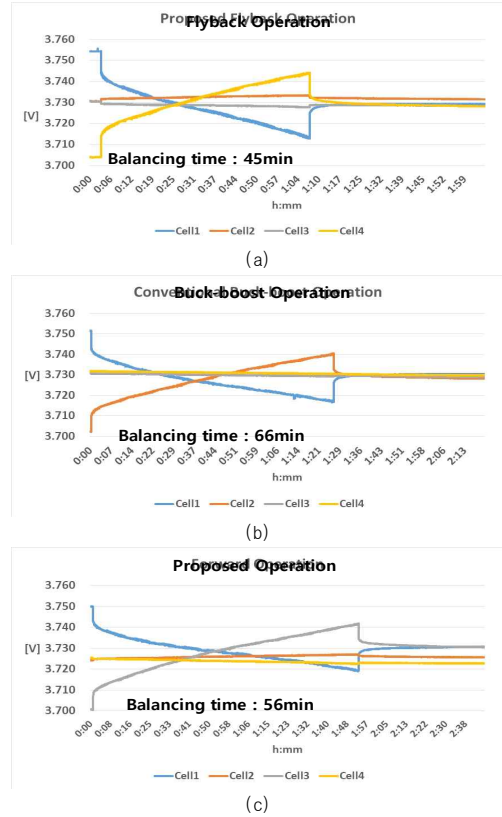


그림 5 셀 밸런싱 실험 결과: (a) 플라이백 동작, (b) 벅-부스트 동작, (c) 제안한 동작
 Fig. 5 Cell balancing experiment results: (a) Flyback operation, (b) Buck-boost operation, (c) Proposed operation.

튬이온 배터리의 용량은 약 75 [Ah]이며, 밸런싱 전류는 4 A로 가정하여 실험을 진행하였다. 기존 방식에서 인접하지 않은 홀수 또는 짝수 셀 간 밸런싱을 수행하기 위해서는 벅-부스트, 플라이백의 연속적인 동작이 요구된다. 따라서 기존 방식에서 밸런싱 시간은 두 모드에서 소요된 밸런싱 시간의 합(111분)으로 예상할 수 있다. 반면, 제안한 방식을 사용할 경우 단일 동작을 통해 소스 셀의 에너지를 목표 셀로 전달하므로, 에너지 전달 경로를 크게 감소시킬 수 있다. 제안한 동작을 사용할 경우, 밸런싱 소요 시간은 약 56분으로 기존 방식에 비해 밸런싱 속도가 약 2배 향상되었다. 이는 배터리 효율 및 밸런싱 회로의 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문은 특정 셀 전압 조건에서 셀 밸런싱 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 동작 모드를 제안하였다. 제안한 방식을 사용할 경우, 동일한 밸런싱 전류 용량 기준에서 셀 밸런싱 속도를 기존 방식에 비해 약 2배 향상시킬 수 있다. 제안한 동작 모드의 성능 검증은 15 W급 시작품을 이용하여 검증 하였다.

참고 문헌

[1] J. Xu, S. Li, C. M, Z. Chen and B. Cao, "SOC Based Battery Cell Balancing with a Novel Topology and Reduced Component Count," Energies, vol. 6, pp. 2726-2740, 2013 May