

다중권선 변압기를 이용한 능동형 셀 밸런싱 회로의 에너지 전달 효율을 높이기 위한 새로운 스위칭 방식

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

A New Switching Method to Improve Energy Transfer Efficiency of Active Cell Balancing Circuits Using Multi-winding Transformer

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

ABSTRACT

본 논문은 다권선 변압기를 이용한 능동형 셀 밸런싱 회로의 에너지 전달 효율을 향상시킬 수 있는 스위칭 방식을 제안한다. 다권선 변압기를 이용한 밸런싱 회로는 셀 당 하나의 스위치가 사용되며, 하나의 변압기 권선을 두 개의 셀이 공유하는 구조를 가져 다른 능동형 셀 밸런싱 회로보다 소량의 능동 소자 및 수동 소자가 사용되는 장점을 갖는다. 이 밸런싱 회로는 직렬 셀 전압의 분포에 따라 에너지를 공급하는 소스 셀과 에너지를 받는 목표 셀을 선택하여 벅 부스트 및 플라이백 방식으로 동작한다. 하지만, 플라이백 동작에서 기존의 스위칭 방식을 사용할 경우, 변압기의 커플링 계수의 영향으로 인해 밸런싱 과정 중 비 목표 셀로 전달되는 에너지가 발생하게 된다. 이는 에너지 전달 효율을 감소시켜 셀 밸런싱 과정 중 새로운 셀 불균형 현상을 초래한다. 본 논문에서는 플라이백 동작에서 변압기의 커플링 영향을 최소화하여 셀 밸런싱을 효과적으로 수행할 수 있는 스위칭 방식을 제안하였다. 제안한 스위칭 방식의 성능은 1 W급 시작품을 이용한 실험을 통하여 검증되었다.

1. 서론

최근 신재생 에너지 발전 및 분산 전원 시스템의 활용이 늘어남에 따라 전원 계통의 안정성 향상을 위해 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)의 사용이 늘어나고 있다. 최근 에너지 밀도 및 전력 밀도가 우수한 리튬 이온 배터리가 에너지 저장 요소로 주로 사용이 되고 있다.

리튬 이온 배터리는 그 화학적인 특성 때문에 항상 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)이 함께 연동되어 사용된다. 일반적으로 리튬이온 배터리의 단일 셀은 3.4~3.7 V의 공칭 전압을 가진다. 따라서 높은 전압이 요구되는 부하 측에 전력을 원활하게 공급하기 위하여 다수의 셀이 직렬로 연결되어 모듈 형태로 사용이 된다. 여러 셀이 직렬로 연결된 경우 각 셀에 동일한 전류가 흐르기 때문에 여러 주기에 걸쳐 충방전을 수행하더라도 각 셀에 저장된 에너지량은 이상적으로 동일하다. 하지만 셀을 제조하는 과정에서 발생하는 셀 내부의 화학적 특성의 불균형과 사용 환경에 의해 발생하는 셀의 내부 변화로 모듈에 동일한 에너지가 충방전 되더라도 셀 간 전압차가 발생하게 된다. 셀 간 전압차가 발생된 후 반복적으로 충방전을 수행할 시 셀 간의 불균형은 더욱 심해지게 되어 최악의 경우 특정 셀이 과충전 혹은 과방전 상태에 노

출된다. 이는 셀의 수명과 성능을 저하시키는 주요 원인이며 심할 경우 셀의 형태가 변하거나 화재의 위험을 가져올 수 있다.

이러한 위험을 막기 위하여 직렬로 연결된 셀이 모두 동일한 에너지를 갖게 하는 셀 밸런싱 기술이 다양하게 연구되고 있다. 그림 1은 다중 권선 변압기를 사용하는 능동형 셀 밸런싱 회로를 나타내고 있다. 임의의 셀에 저장된 에너지를 변압기에 저장하여 목표 셀에 전달하는 방식으로 밸런싱을 수행하며 목표 셀의 위치에 따라 회로는 플라이백 또는 벅 부스트 동작으로 선택적으로 에너지를 전달한다^[1]. 하지만, 플라이백 동작에서 기존 스위칭 방식을 사용할 경우, 변압기의 커플링 계수 영향으로 인해 밸런싱 과정 중 비 목표 셀로 전달되는 에너지가 발생하게 된다. 이는 에너지 전달 효율을 감소시켜 셀 밸런싱 과정 중 새로운 셀 불균형 현상을 초래한다. 본 논문에서는 플라이백 동작에서 변압기의 커플링 영향을 최소화하여 셀 밸런싱을 효과적으로 수행할 수 있는 스위칭 방식을 제안하였다.

2. 동작 모드 분석

2.1 기존 스위칭 방식의 플라이백 동작

그림 1은 셀 밸런싱 회로가 플라이백 동작을 할 때의 전류 경로를 나타내고 있으며, 그림 2는 주요 동작 과정을 나타내고 있다. 인접하지 않은 셀 간에 전압 밸런싱을 수행할 경우 회로는 플라이백으로 동작한다. 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1과 셀 4로 설정하고 분석을 진행하였다.

모드 1 [t_0 t_1]: 셀 1의 에너지를 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)에 저장하기 위하여 S_1 을 턴 온 한다. 이때 에너지는 L_m 뿐만 아니라 L_k 에도 저장이 된다. 이 구간에서 권선 1(L_1)에 흐르는 전류 i_{L1} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = \frac{V_{Cell}}{L_k + L_m}(t - t_0). \quad (1)$$

모드 2 [t_1 t_2]: S_1 과 S_4 가 동시에 턴 온 되지 않도록 데드 타임을 가진다.

모드 3 [t_2 t_3]: S_4 가 턴 온 되면 모드 3이 시작 된다. 전류 i_{L2} 는 S_4 를 통해 전류가 흐르며, 전류 i_{L1} 은 S_2 의 바디 다이오드(D_2)를 통해 전류가 흐르게 된다. 모드 3에 발생하는 i_{L1} 의 전류 경로는 비 목표 셀에 전달되는 전류 경로로써, 이 경로로 흐르는 전류는 목표하지 않은 셀로 전달된다. 이 구간에서 각

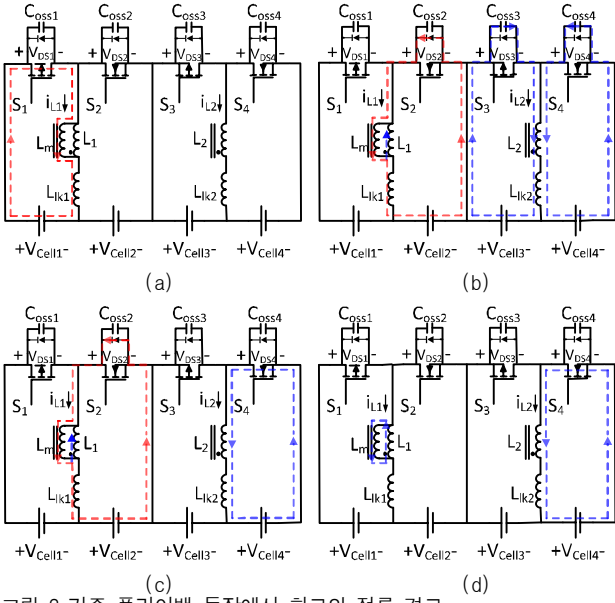


그림 2 기존 플라이백 동작에서 회로의 전류 경로
Fig. 2 Current path of circuit in conventional flyback operation
(a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

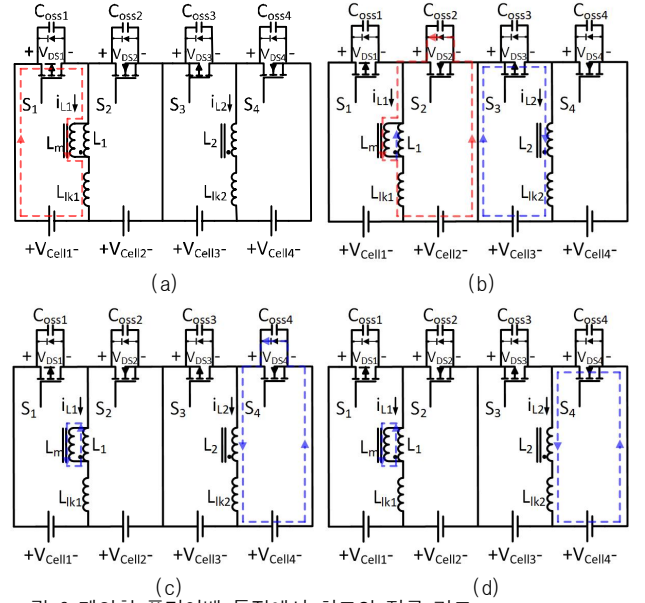


그림 6 제안한 플라이백 동작에서 회로의 전류 경로
Fig. 6 Current path of circuit in proposed flyback operation
(a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

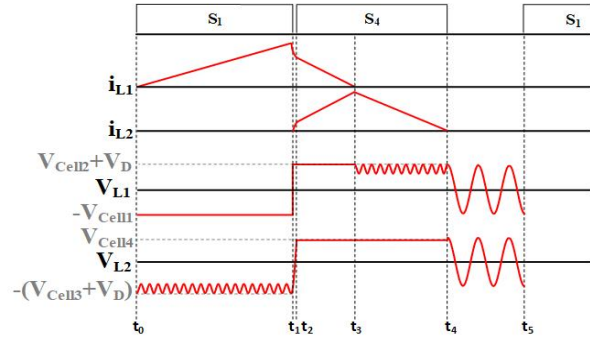


그림 4 기존 플라이백 동작 시 주요 파형
Fig. 4 Key waveform in conventional flyback operation

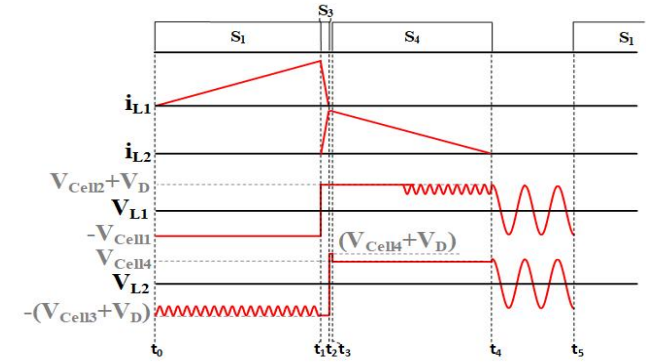


그림 7 제안한 플라이백 동작 시 주요 파형
Fig. 7 Key waveform in flyback operation

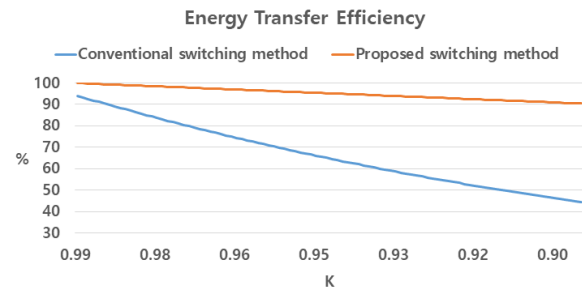


그림 5 플라이백 동작의 에너지 전달 효율
Fig. 5 Energy transfer efficiency in flyback operation

전류공식은 식 (2)와 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1-t2} + \left(\frac{V_{Lm} - V_{Cell2} - V_D}{L_{k1}} \right) (t - t_2) \quad (2)$$

$$i_{L2}(t) = i_{L2-t2} + \left(\frac{V_{Lm} - V_{Cell4}}{L_{k2}} \right) (t - t_2) \quad (3)$$

모드 3 구간이 증가할수록 플라이백 동작에서 에너지 전달 효

율은 감소하게 된다. 여기서 V_{Lm} 은 모드 3에서 L_m 에 인가되는 평균 전압이며 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_{Lm} = \left(\frac{V_{Cell2} + V_{Cell4} + V_D}{L_{lk} + 2L_m} \right) L_m. \quad (4)$$

여기서 i_{L2} 의 전류 기울기는 V_{Lm} 과 V_{Cell4} 의 전압 차에 의해 결정이 되며, L_{lk} 값이 감소하면 V_{Lm} 이 감소하게 된다. 따라서 식 (3)을 통해 L_{lk} 가 증가할수록 목표 셀에 전달되는 전류량이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 변압기의 커플링 계수에 따른 에너지 전달 효율을 나타내고 있으며, 에너지 전달 효율은 식 (1) ~ 식 (4)를 이용하여 소스 셀에서 방전된 전류와 목표 셀로 전달된 전류를 계산하여 두 전류의 비로 표현되었다.

모드 4 [t_3 t_4]: 전류 i_{L1} 이 0으로 감소하면 모드 4가 시작 된다. 이 구간에서 L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀에 전달되게 된다. 이 구간에서 i_{L2} 는 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$i_{L2}(t) = i_{L2-t3} - \frac{V_{Cell4}}{L_{l2} + L_m} (t - t_3). \quad (5)$$

모드 5 [t_4 t_5]: L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀로 전달이 된 후 다음 스위칭 주기 전까지 L_m 과 C_{oss} 에 의해 공진이 발생

한다.

2.2 제안한 플라이백 동작

모드 1 [t_0 t_1]: 셀 1의 에너지를 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)에 저장하기 위하여 S_7 을 턴 온 한다. 전류 i_{L1} 은 식 (1)로 표현될 수 있다.

모드 2 [t_1 t_2]: S_3 가 켜지면 모드 2가 시작된다. 전류 i_{L1} 은 식 (2)와 같으며, 모드 2에서 V_{LM} 은 식 (6)으로 표현될 수 있다. S_3 를 턴 온 함으로써 V_{LM} 전압이 크게 감소하여 i_{L1} 이 0으로 도달하는 시간이 감소하게 된다. i_{L1} 이 0으로 도달하는 시간은 식 (7)으로 표현할 수 있다.

$$V_{Lm_M2} = \left(\frac{V_D}{L_{lk} + 2L_m} \right) L_m \quad (6)$$

$$t_2 - t_1 = \left(\frac{L_{lk1}}{V_D + V_{cell2} - V_{Lm_M2}} \right) \quad (7)$$

이 구간에서 전류 i_{L1} 은 MOSFET 2의 다이오드를 통해 흐르게 되어 비 목표 셀에 에너지가 전달되게 된다. 그림 5는 제안한 스위칭 방식에서 에너지 전달 효율 그래프를 나타내고 있다. 기존 스위칭 방식은 커플링 계수에 따라 에너지 전달 효율이 크게 감소하는 반면, 제안한 스위칭 방식에서는 커플링 계수가 에너지 전달 효율에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 커플링 계수가 낮은 경우에도 목표 셀에 에너지를 효과적으로 전달할 수 있다.

모드 3 [t_2 t_3]: S_3 와 S_4 를 각각 동시에 턴 온, 턴 오프할 경우 암 쇼트(arm short) 위험이 발생할 수 있으므로 데드 타임 구간을 필요로 한다.

모드 4 [t_3 t_4]: S_4 를 턴 온 하면 L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀에 전달되게 된다. S_4 의 턴 온 시간은 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$t_4 - t_3 = \left(\frac{L_s}{V_{Cell4}} \right) i_{L2_t3} \quad (8)$$

모드 5 [t_4 t_5]: L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀로 전달이 된 후 다음 스위칭 주기 전까지 L_m 과 C_{oss} 에 의해 공진이 발생한다.

3. 실험 결과

표 1은 실험 조건을 나타내고 있으며, 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1, 셀 4로 가정하였다. 그림 8은 플라이백 동작에서 기존 스위칭 방식일 경우의 변압기 권선 전류 파형을 나타내고 있다. 기존 스위칭 방식 경우 S_4 가 턴 온 된 후에도 L_m 에 저장된 에너지가 L_l 권선을 통해 비 목표 셀(셀 2)에 전달되어 목표 셀에 전달되는 에너지양이 크게 감소하게 된다. 커플링 계수가 0.95 일 때 약 69%의 에너지 전달 효율을 가진다.

그림 9는 플라이백 동작에서 제안한 스위칭 방식일 경우의 변압기 권선 전류 파형을 나타내고 있다. S_7 이 턴 오프 된 후 S_3 를 턴 온 함으로써 L_l 권선을 통해 비 목표 셀(셀 2)에 전달되는 에너지양이 크게 감소하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 커플링 계수가 0.95일 때 95%의 에너지 전달 효율을 가지며, 기존 방식에 비해 전달 효율이 26% 향상 되었다.

표 1 실험 조건

Table 1 Experimental Conditions

Parameter	Value
V_{Cell4}	3.7 [V]
V_D	0.8 [V]
f_{sw}	20 [kHz]
L_m	80 [uH]
L_{lk}	4 [uH]
k	0.95

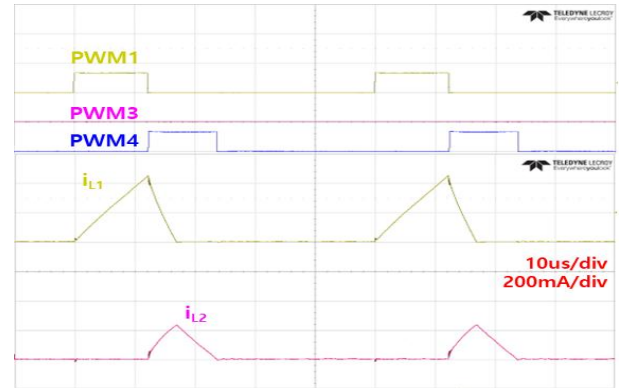


그림 8 기존 플라이백 동작 시 주요 파형

Fig. 8 Key waveform in conventional flyback operation

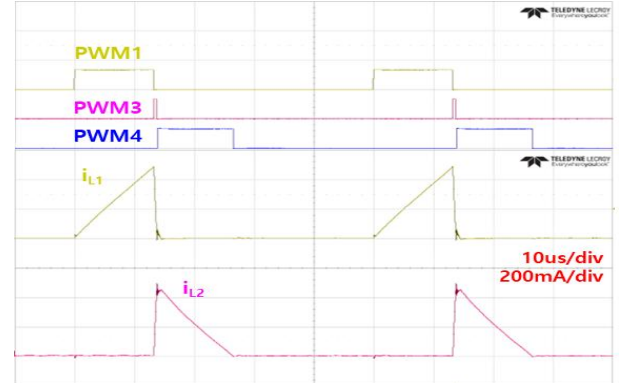


그림 8 제안한 플라이백 동작 시 주요 파형

Fig. 8 Key waveform in proposed flyback operation

4. 결론

본 논문은 다중 권선 변압기를 사용한 셀 간 직접 밸런싱 회로에서 플라이백 동작을 자세히 분석하고 에너지 전달 효율을 높일 수 있는 새로운 스위칭 방식을 제안하였다. 제안한 스위칭 방식의 성능은 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임(No. 18 12 N0101 35)

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