

다중권선 변압기를 이용한 능동형 셀 밸런싱 회로의 에너지 전달 효율을 높이기 위한 향상된 스위칭 패턴

이상중¹, 김명호², 백주원², 정지훈[†]

Enhanced Switching Pattern to Improve Energy Transfer Efficiency of Active Cell Balancing Circuits Using Multi-winding Transformer

Sang-Jung Lee¹, Myoung-ho Kim², Ju-Won Baek², and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

This study proposes an enhanced switching pattern that can improve energy transfer efficiency in an active cell-balancing circuit using a multiwinding transformer. This balancing circuit performs cell balancing by transferring energy stored in a specific cell with high energy to another cell containing low energy through a multiwinding transformer. The circuit operates in flyback and buck-boost modes in accordance with the energy transfer path. In the conventional flyback mode, the leakage inductance of the transformer and the stray inductance component of winding can transfer energy to an undesired path during the balancing operation. This case results in cell imbalance during the cell-balancing process, which reduces the energy transfer efficiency. An enhanced switching pattern that can effectively perform cell balancing by minimizing the amount of energy transferred to the nontarget cells due to the leakage inductance components in the flyback mode is proposed. Energy transfer efficiency and balancing speed can be significantly improved using the proposed switching pattern compared with that using the conventional switching pattern. The performance improvements are verified by experiments using a 1 W prototype cell-balancing circuit.

Key words: Active cell balancing, Cell balancing techniques, Multi-winding transformer, BMS(Battery Management System), Energy transfer efficiency

1. 서 론

최근 전기자동차, 에너지 저장 시스템에 에너지 밀도와 전력 밀도가 우수한 리튬 폴리머 또는 리튬 이온 셀이 전압원으로 널리 사용되고 있다. 일반적으로 리튬이온과 리튬 폴리머의 단일 셀은 3.7 V의 낮은 공칭 전압을 가진다. 따라서 고압 대용량 시스템에 적용하기 위해 다수의 배터리 셀을 직렬 및 병렬로 적층된 모듈 형태로

사용이 된다. 모듈 내 직렬로 연결된 셀에는 동일한 전류가 흐르기 때문에 배터리 모듈이 여러 번의 충전 과정을 거치더라도 모든 셀은 동일한 충전 상태를 가지게 된다. 하지만 각 셀의 내부 화학적 특성의 불균형과 운전 환경에 의해 모든 셀에 동일한 에너지가 충전되더라도 셀 간의 전하 불균형 현상이 발생하게 된다. 셀 간 전압차가 발생된 후 반복적으로 충전, 방전을 수행할 시 셀 간의 불균형은 더욱 심해지게 되어 최악의 경우 특정 셀이 과충전 혹은 과방전 될 수 있다. 셀이 과 방전될 경우 셀의 수명은 단축되며, 과충전에 노출될 경우 화재의 위험을 가져올 수 있다. 이러한 위험을 막기 위해 직렬로 연결된 셀이 모두 동일한 에너지를 갖게 하는 셀 밸런싱 기술은 필요로 한다.

셀 밸런싱 기술은 크게 수동 방식과 능동 방식으로 나눌 수 있다^[1]. 수동 방식은 상대적으로 높은 충전량을 가진 셀의 에너지를 낮은 충전량을 가진 셀과 같아질 때까지 저항으로 소비하는 방식이다. 셀 당 하나의 저항

Paper number: TKPE-2019-24-4-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr, Division of Electrical and Computer Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)
Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ Division of Electrical and Computer Engineering, UNIST

² Power Conversion & Control Research Center, KERI
Manuscript received Oct. 31, 2018; revised Dec. 11, 2018; accepted Feb. 12, 2019

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

소자와 반도체 스위치를 사용하여 회로 구성이 간단하다는 장점을 가지고 있다^[2]. 하지만 불균형이 발생할 때마다 보다 높은 전압을 가진 셀들의 에너지를 모두 소비시켜 시스템의 에너지 효율을 떨어뜨리는 단점이 있다. 또한 밸런싱 저항에서 발생하는 열로 인해 주변회로 동작에 영향을 줄 수 있기 때문에 밸런싱 전류를 일정 값 이상 증가시킬 수 없다. 이러한 수동 방식의 단점을 보완하기 위한 방식으로 제안된 셀 밸런싱 기술이 능동 방식이다. 능동 방식은 비교적 높은 전압을 가진 셀의 에너지를 가장 낮은 전압을 갖는 셀에 전달하여 셀 간 전하 불균형 문제를 해결한다. 따라서 수동 방식보다 에너지 효율이 높다는 장점을 가진다. 능동 방식에서는 커패시터 또는 인덕터와 같은 에너지 저장 요소를 사용하여 밸런싱을 수행한다. 커패시터를 이용한 밸런싱 회로는 밸런싱 전류가 셀 간 전압 차에 의해 제한되기 때문에 셀 간 전압 차이가 작을수록 밸런싱의 속도가 크게 감소하게 된다^{[3][5]}. 또한 돌입 전류를 방지하기 위하여 저항이 사용되어 회로의 효율이 저하되는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 인덕터를 이용한 밸런싱 회로는 셀 간 전압 차에 의해 발생하는 밸런싱 속도 저하의 문제가 없으며 저항과 같은 수동 소자를 제거함으로써 회로의 효율을 높일 수 있는 장점이 있다^[6]. 하지만 인접하지 않은 셀 간 밸런싱을 수행할 경우 에너지가 여러 셀을 걸쳐 전달되기 때문에 밸런싱 속도가 감소하는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 해결하기 위해 셀 간 직접(direct cell-to-cell) 에너지를 전달하여 밸런싱을 수행할 수 있는 회로에 대한 연구가 수행되었다^[7].

그림 1은 [7]에서 제안한 다중 권선 변압기를 사용하는 능동 셀 밸런싱 회로를 나타내고 있다. 이 밸런싱 회로는 셀 당 하나의 스위치가 사용되고 두 셀이 하나의 변압기 권선을 공유하여 다른 능동 밸런싱 회로에 비해 사용되는 수동 소자 및 능동 소자의 수가 적은 장점을 가진다. 참고문헌 [8]에서는 이 회로의 동작에 대한 자세한 분석을 수행하였다. 이 회로는 임의의 셀에 저장된 에너지를 변압기에 저장하여 목표 셀에 전달하는 방식으로 밸런싱을 수행하며 에너지를 전달할 셀의 위치에 따라 회로는 벡-부스트 또는 플라이백으로 동작한다.

하나의 권선을 공유하는 인접한 셀 간 밸런싱을 수행할 경우, 이 회로는 벡-부스트로 동작을 한다. 벡-부스트 동작으로 밸런싱을 수행할 경우, 다중 권선 변압기의 각 권선은 독립적인 인덕터처럼 동작하여 인접한 셀 간 에너지를 전달한다. 따라서 변압기의 결합 계수가 낮을수록 변압기의 각 권선은 단일 인덕터에 가깝게 동작하기 때문에 벡-부스트 동작에 유리한 조건을 갖는다. 하지만, 결합 계수가 높은 변압기를 사용하더라도 벡-부스트 동작에서 타 권선으로 전달되는 에너지는 매우 작기 때문에 에너지 전달 효율에 크게 영향을 주지 않는다^[8].

위와 반대로, 하나의 권선을 공유하지 않는 셀 간 밸런싱을 수행할 경우, 회로는 플라이백으로 동작한다. 벡-

부스트 동작과 달리, 변압기는 결합 인덕터로 동작한다. 인접하지 않은 셀 간 에너지를 전달하기 위해서는 변압기에 저장된 에너지가 목표 셀에 해당하는 권선으로 전달되어야 한다. 따라서 결합 계수가 높을수록 밸런싱 동작에 유리하다. 하지만, 변압기 제조 과정에서 발생하는 누설 인덕턴스 성분 및 셀과 변압기 사이에 존재하는 권선의 기생 인덕턴스 성분이 변압기의 결합 계수를 감소시키기 때문에, 완벽한 결합 계수를 갖는 변압기를 제작하는 것은 다소 한계가 있다. 결합 계수가 낮을 때 기존 플라이백 스위칭 방식을 사용할 경우 누설 인덕턴스의 영향으로 변압기에 저장된 에너지 중 일부가 비 목표 셀로 전달된다. 이는 밸런싱 과정 중 새로운 셀 불균형 현상을 초래하여 추가적인 밸런싱 동작을 요구한다. 결과적으로 변압기의 커플링 계수가 낮을수록 밸런싱 속도가 느려지며 추가적인 밸런싱 동작으로 인해 회로의 효율이 감소하게 된다. 본 논문에서는 플라이백 동작에서 낮은 결합 계수를 갖는 변압기를 사용하더라도 목표 셀로 에너지를 효과적으로 전달할 수 있는 새로운 스위칭 방식을 제안하였다.

2. 동작 모드 분석

동작 모드의 분석에 앞서 다음과 같은 가정을 한다. 첫 번째, 다중권선 변압기에 누설 인덕턴스(L_{lk}) 성분이 존재하며, 각 권선의 L_{lk} 는 동일하다. 두 번째, MOSFET의 도통 저항(R_{ds})은 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 세 번째, MOSFET은 모두 동일한 크기의 출력 기생 커패시턴스(C_{oss})를 가진다. 네 번째, 셀 간의 전압 차이는 무시할 수 있을 정도로 작으며, 밸런싱 과정 중 셀의 전압이 일정하다. 마지막으로, 변압기의 권선이 2개일 경우에서 분석을 진행하였다. 변압기의 권선이 늘어나도 각 동작의 모드들은 동일하기 때문에 권선의 수가 더 많은 경우에도 이 분석을 동일하게 적용할 수 있다.

본 논문에서는 목표 셀에 전달된 밸런싱 전류와 소스 셀에서 빠져나간 밸런싱 전류의 비를 에너지 전달 효율이라 정의한다. 밸런싱 전류 전달 효율이 높을수록 셀 밸런싱 속도가 빨라지며, 시스템 효율이 높아진다.

2.1 기존 스위칭 방식의 플라이백 동작

그림 1은 셀 밸런싱 회로가 플라이백 동작을 할 때의 전류 경로를 나타내고 있다. 그림 2는 모드 3에서의 등가회로를 나타내고 있으며, 그림 3은 주요 동작 파형을 나타내고 있다. 인접하지 않은 셀 간에 전압 밸런싱을 수행할 경우 회로는 플라이백으로 동작한다. 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1과 셀 4로 설정 하고 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 에

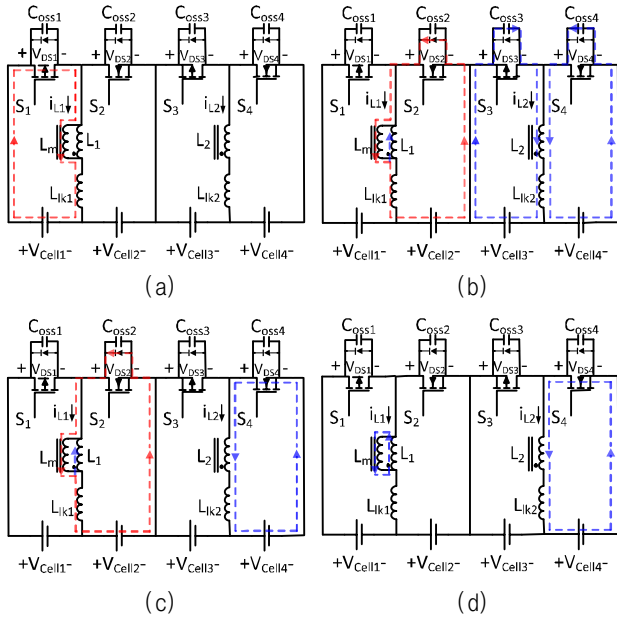


Fig. 1. Current path of cell balancing circuit in the conventional flyback operation: (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

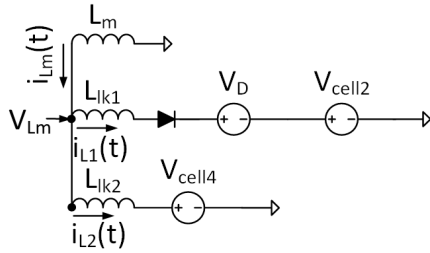


Fig. 2. Equivalent circuit of mode 3 in the conventional flyback operation.

너지는 L_m 뿐만 아니라 L_{lk} 에도 저장이 된다. 이 구간에서 권선 1(L_1)에 흐르는 전류 i_{L1} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = \frac{V_{Cell1}}{L_{lk} + L_m}(t - t_0). \quad (1)$$

모드 2 [t_1 - t_2]: S_1 과 S_4 가 동시에 턴-온 될 경우, 각 권선에 반대의 전압이 인가되어 권선의 전류 기울기가 급격하게 변할 수 있다. 따라서 S_4 를 턴-온 하기 전 데드 타임을 가진다.

모드 3 [t_2 - t_3]: S_4 가 턴-온 되면 전류 i_{L2} 는 S_4 를 통해 흐르며, 소스 셀에 해당하는 스위치가 턴-오프 되면 전류 i_{L1} 은 S_2 의 바디 다이오드(D_2)를 통해 흐르게 된다. i_{L1} 의 전류 경로로 인해 L_{lk1} 에 저장된 에너지가 소스 셀 하단에 있는 스위치의 D_2 를 통해 비 목표 셀(셀 2)로 에너지가 전달되게 된다. 이때, L_m 에 저장된 에너지 중 일부도 비 목표 셀(셀 2)로 전달되게 된다. 모드 3에 발생

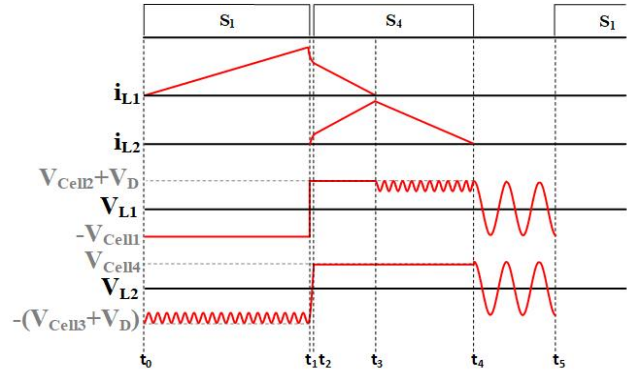


Fig. 3. Theoretical waveforms of the conventional flyback operation.

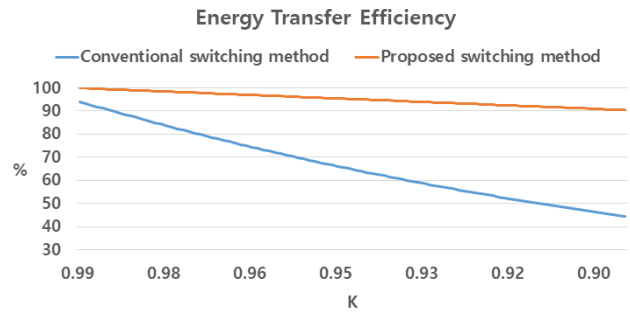


Fig. 4. Energy transfer efficiency in flyback operations.

하는 i_{L1} 의 전류 경로는 비 목표 셀(셀 2)에 전달되는 전류 경로이기 때문에 해당 구간이 길어질수록 플라이백 동작에서 에너지 전달 효율이 감소하게 된다. 그림 2는 모드 3의 등가회로를 나타내고 있다. 모드 3에서 각 권선에 흐르는 전류는 등가회로를 이용해 식 (2)와 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1,t_2} + \left(\frac{V_{Lm_MB} - V_{Cell2} - V_D}{L_{lk1}} \right) (t - t_2) \quad (2)$$

$$i_{L2}(t) = i_{L2,t_2} + \left(\frac{V_{Lm_MB} - V_{Cell4}}{L_{lk2}} \right) (t - t_2) \quad (3)$$

여기서 V_D 는 바디 다이오드의 도통 전압을 나타내며, V_{Lm_MB} 는 모드 3에서 L_m 에 인가되는 평균 전압을 나타낸다. V_{Lm_MB} 는 등가회로의 노드에 KCL을 적용하여 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

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

i_{L2} 의 전류 기울기는 V_{Lm_MB} 와 V_{Cell4} 의 전압 차에 의해 결정이 되며, 전압 차이가 작을수록 i_{L2} 의 전류 기울기가 감소하여 비 목표 셀에 전달되는 전류량이 증가하게 된다. 식 (4)를 통해 L_{lk} 값이 증가할수록 V_{Lm_MB} 가 감소하게 되어 에너지 전달 효율이 감소하는 것을 알 수 있다.

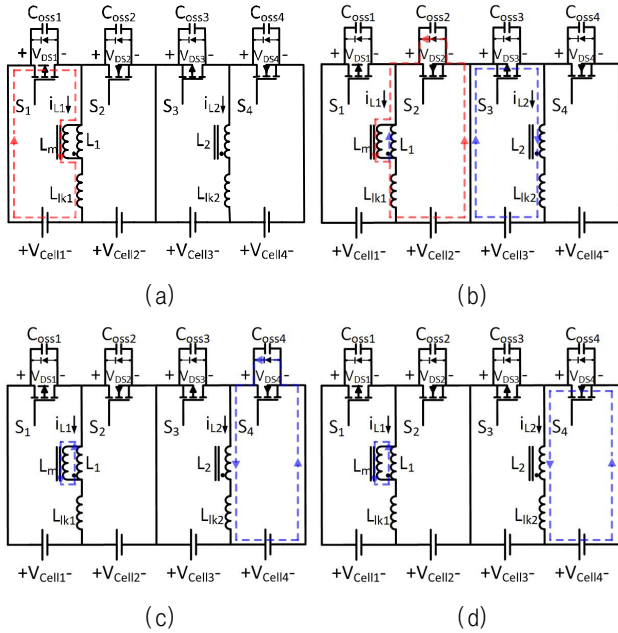


Fig. 5. Current path of cell balancing circuit in the proposed flyback operation: (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

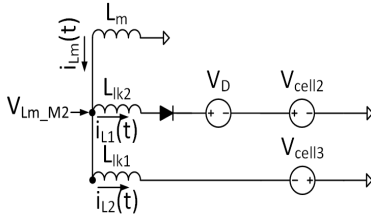


Fig. 6. Equivalent circuit of mode 2 in the proposed flyback operation.

$$q_{source} = \int_{t_0}^{t_1} i_{L1}(t) dt \quad (5)$$

$$q_{non_target} = \int_{t_2}^{t_3} i_{L1}(t) dt \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 각각 소스 셀로부터 방출된 전하량과 비 목표 셀로 전달되는 전하량을 나타내고 있다. 여기서 q_{source} 는 소스 셀로부터 방출된 전하량이며, $q_{non-target}$ 은 비 목표 셀로 전달되는 전하량이다.

$$Energy\ Transfer\ Efficiency = \frac{q_{source} - q_{non_target}}{q_{source}} \quad (7)$$

에너지 전달 효율은 식 (7)을 통해 구할 수 있으며, 소스 셀에서 방출된 전하량과 목표 셀로 전달된 전하량의 비로 표현될 수 있다. 그림 4는 식 (7)을 이용하여 기존 스위칭 방식에서의 에너지 전달 효율을 나타내고 있다. 기존 스위칭 방식에서는 변압기의 결합 계수가 낮아질수록 에너지 전달 효율이 급격하게 감소한다.

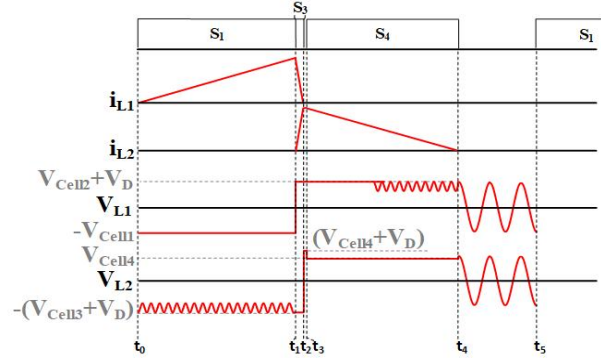


Fig. 7. Theoretical waveforms of the proposed flyback operation.

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 (8)로 표현할 수 있다.

$$i_{L2}(t) = i_{L2_t3} - \frac{V_{Cell4}}{L_{lk2} + L_m}(t - t_3). \quad (8)$$

모드 5 [t_4-t_5]: L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀로 전달이 된 후 다음 스위칭 주기 전까지 변압기의 자기인덕턴스(L_s)와 C_{oss} 에 의해 공진이 발생한다.

2.2 제안한 스위칭 방식의 플라이백 동작

그림 5는 제안한 플라이백 동작의 전류 경로를 나타내고 있으며, 그림 6는 모드 2에서의 등가회로를, 그림 7은 주요 동작 파형을 나타내고 있다.

모드 1 [t_0-t_1]: 셀 1의 에너지를 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)에 저장하기 위하여 S_1 을 턴-온 한다. 전류 i_{L1} 은 식 (1)로 표현될 수 있다.

모드 2 [t_1-t_2]: 비 목표 셀에 흐르는 전류를 최소화하기 위해 목표 셀에 해당하는 스위치를 턴-온 하기 전, 추가적인 스위치 동작이 모드 2에서 수행된다. S_3 를 턴-온 하면 모드 2가 시작 된다. 그림 6은 모드 2의 등가회로를 나타내고 있다. S_3 를 턴-온하게 되면 각 권선에 반대 극성의 전압이 인가된다. 이때, L_1 에 흐르는 전류 i_{L1} 은 식 (2)와 동일하게 표현될 수 있으며, 모드 2에서 V_{LM_M2} 는 식 (9)로 표현될 수 있다.

$$V_{LM_M2} = \left(\frac{V_D}{L_{lk} + 2L_m} \right) L_m \quad (9)$$

기존 스위칭 방식의 V_{LM_M3} 수식에서 비 목표 셀과 목표 셀의 전압 그리고 다이오드 도통 전압의 합이 수식의 전압 변수로 나타난다. 하지만, 제안한 방식에서 S_3 를 턴-온 함으로써 V_{LM_M2} 의 수식에서는 오직 다이오드 도통

TABLE I
DESIGN PARAMETERS

Parameter		Value	
Battery	Model	ICR18650-28A	
	Nominal capacity	2.8 [Ah]	
	Nominal voltage	3.7 [V]	
	Maximum Charging current	2.8 [A]	
	Dimension	Height	65.00 [mm]
		Diameter	18.40 [mm]
Weight	48.0 [g]		
MOSFET (FDC6327C)	$I_{D,N-type}$	2.7 [A]	
	$I_{D,P-type}$	1.6 [A]	
	V_D	0.8 [V]	
	f_{sw}	20 [kHz]	
	L_s	78 [uH]	
	C_{oss}	300 [pF]	
$k = 0.95$	L_m	74.1 [uH]	
	L_{lk}	3.7 [uH]	

전압만 전압 변수로 나타나게 된다. 제안한 방식의 모드 2에서 $V_{LM,M2}$ 전압은 다이오드 도통 전압의 약 절반으로 감소하기 때문에 L_{lk} 에 인가되는 음의 전압이 크게 증가한다. 결과적으로 i_{L1} 의 전류 기울기를 음으로 크게 증가시켜, 짧은 시간 내에 i_{L1} 과 i_{L2} 를 각각 0과 최대값으로 도달 시킬 수 있다. i_{L1} 이 0으로 도달하는 시간은 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$t_2 - t_1 = \left(\frac{L_{lk1}}{V_D + V_{cell2} - V_{LM,M2}} \right) i_{L1,t2} \quad (10)$$

그림 4는 제안한 스위칭 방식에서 에너지 전달 효율 그래프를 나타내고 있다. 기존 스위칭 방식은 결합 계수에 따라 에너지 전달 효율이 크게 감소하는 반면, 제안한 스위칭 방식에서는 변압기 결합 계수가 에너지 전달 효율에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 결합 계수가 낮은 경우에도 소스 셀에 저장된 에너지를 목표 셀로 효과적으로 전달할 수 있다.

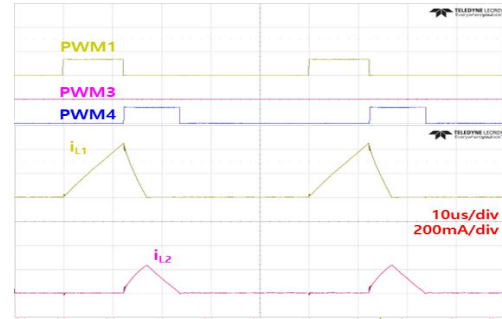
모드 3 [t_2-t_3]: S_3 와 S_4 를 각각 동시에 턴-온, 턴-오프할 경우 암 쇼트(arm-short)가 발생할 수 있으므로 데드 타임 구간을 필요로 한다.

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 (11)로 표현할 수 있다.

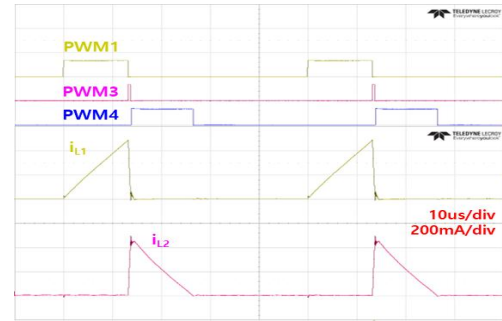
$$t_4 - t_3 = \left(\frac{L_s}{V_{Cell4}} \right) i_{L2,t3} \quad (11)$$

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS OF FLYBACK OPERATION

Experimental results of flyback operation			
Parameter		Value	Transfer efficiency
Conventional Switching pattern	$I_{L1,charge}$	113 [mA]	68%
	$I_{L1,non-target}$	36 [mA]	
Proposed Switching pattern	$I_{L1,charge}$	124 [mA]	96%
	$I_{L1,non-target}$	5 [mA]	



(a) Conventional flyback operation



(b) Proposed flyback operation

Fig. 8. Key waveform in flyback operation.

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

3. 실험 결과

3.1 밸런싱 전류 전달 효율

표 1은 밸런싱 회로의 주요 파라미터를 나타내고 있다. 실험에 사용된 스위칭 소자의 파트명은 FDC6327C이며, 하나의 칩에 N-type과 P-type MOSFET이 내장되어 있다. 이 회로는 20 kHz의 스위칭 주파수(f_{sw})에서 동작하며, 다중 권선 변압기는 약 0.95의 결합 계수를 갖는다. 플라이백 동작에서 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1, 셀 4로 가정하였으며, 소스 셀에 해당하는 권선 전류의 실효값을 150 mA로 가정하여 실험을 진행하였

다. 그림 8(a)는 플라이백 동작에서 기존 스위칭 방식일 경우의 변압기 각 권선의 전류 파형을 나타내고 있다. 기존 스위칭 방식 경우 S_4 가 턴-온 된 후에도 변압기의 누설 인덕턴스 성분과 셀과 변압기 사이에 존재하는 권선의 기생 인덕턴스 성분으로 인해 변압기 L_m 에 저장된 에너지가 L_1 의 권선을 통해 비 목표 셀(셀 2)에 전달되어 목표 셀에 전달되는 에너지양이 감소하게 된다. 그림 8(b)는 플라이백 동작에서 제안한 스위칭 방식일 경우의 변압기 각 권선의 전류 파형을 나타내고 있다. 제안한 스위칭 방식을 사용함으로써 L_1 권선을 통해 비 목표 셀(셀 2)로 에너지가 전달되는 구간이 크게 감소되었으며, 목표 셀에 해당하는 권선(L_2)의 전류량이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 표 2는 스위칭 방식에 따른 에너지 전달 효율을 나타내고 있다. 여기서 $I_{LL,charge}$ 는 소스 셀에서 방전된 평균 전류이며, $I_{LL,non-target}$ 은 비 목표 셀로 전달된 평균 전류이다. 평균 전류는 오실로스코프에서 제공하는 평균값 계산 기능을 사용하여 측정하였다. 기존 스위칭 방식으로 셀 밸런싱을 수행할 경우, $I_{LL,charge}$ 는 113 mA이며, $I_{LL,non-target}$ 은 36 mA이다. 따라서 기존 스위칭 방식의 경우, 약 68%의 에너지 전달 효율을 갖는다. 반면에 제안한 스위칭 방식을 사용할 경우, $I_{LL,charge}$ 는 124 mA, $I_{LL,non-target}$ 은 5 mA로 $I_{LL,non-target}$ 이 기존 방식보다 약 31mA 감소하였다. 이때, 에너지 전달 효율은 96%로 기존 스위칭 방식보다 28% 증가하였다. 제안한 플라이백 동작에서 새로운 스위칭 패턴(PWM3)을 추가함으로써, 낮은 결합 계수에서도 비 목표 셀로 전달되는 에너지를 최소화하여 기존의 플라이백 방식에 비하여 높은 에너지 전달 효율을 달성할 수 있는 것을 실험을 통해 검증하였다.

3.2 셀 밸런싱 테스트

그림 9의 (a)는 기존 스위칭 방식을 사용했을 때의 셀 밸런싱 결과를 나타내고 있으며, 그림 9의 (b)는 제안한 스위칭 방식을 사용하였을 때의 셀 밸런싱 결과를 나타내고 있다. 실험 조건은 표 1과 동일하며, 밸런싱 전류의 크기도 150 mA로 동일하다. 기존 스위칭 방식에서 소스 셀(셀 1)의 초기 전압은 3.754 V이며, 목표 셀(셀 4)의 초기 전압은 3.7 V로 두 셀은 약 50 mV의 전압차를 갖는다. 기존 방식에서 50 mV의 전압차가 밸런싱 되기까지 약 1시간 40분이 소요된다. 또한 결합 계수가 0.95일 때 기존 방식에서 약 68%의 에너지 전달 효율을 가지므로 셀 밸런싱 수행 과정 중 비 목표 셀(셀 2)의 전압이 약 11 mV 상승하게 된다. 따라서 새로운 셀 불균형 현상으로 인해 추가적인 밸런싱 동작이 수행되어야 한다.

제안한 스위칭 방식에서 소스 셀(셀 1)과 목표 셀(셀 4)의 초기 전압은 기존 스위칭 방식의 실험 조건과 동일하다. 제안한 스위칭 방식을 사용한 경우, 50 mV의 전압 차가 밸런싱 되기까지 약 1시간 4분이 소요된다. 기존

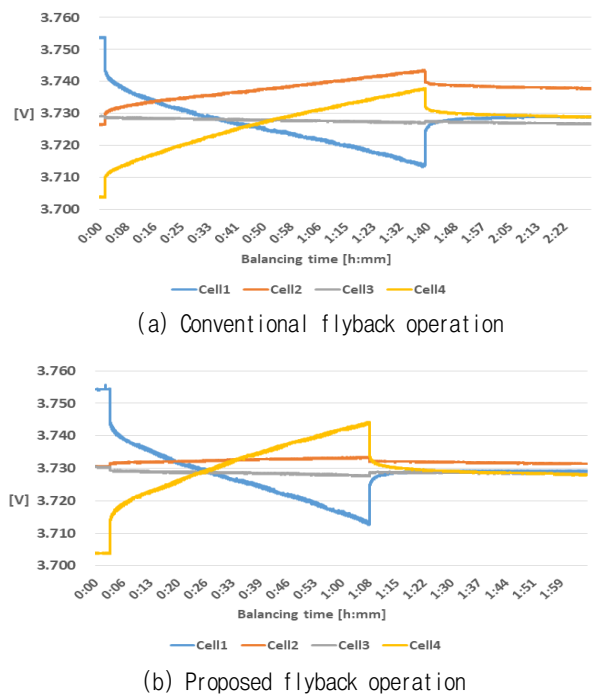


Fig. 9. Cell balancing in flyback operations.

방식과 비교하였을 때 밸런싱 속도가 약 1.4배 증가하였다. 또한, 제안한 스위칭 방식은 96%의 높은 에너지 전달 효율을 가지기 때문에 셀 밸런싱 과정 중 비 목표 셀(셀 2)로 전달되는 에너지는 거의 발생하지 않는다. 밸런싱이 종료되었을 때 셀 2의 전압 변동은 약 1 mV로 밸런싱 과정 중 새로운 셀 불균형 현상이 발생하지 않는 것을 실험을 통해 확인하였다. 결과적으로, 제안한 플라이백 스위칭 방식을 사용함으로써 에너지 전달 효율과 밸런싱 속도를 크게 증가시킬 수 있는 것을 실험을 통해 검증하였다.

4. 결론

본 논문은 다중 권선 변압기를 사용한 셀 간 직접 밸런싱 회로의 자세한 동작 모드를 분석하고 변압기의 결합 계수에 따른 에너지 전달 효율을 해석적으로 도출하였다. 또한, 다중 권선 변압기의 결합 계수가 플라이백 동작의 에너지 전달 효율에 영향을 주는 것을 보여주었으며, 이를 고려하여 에너지 전달 효율을 높일 수 있는 새로운 스위칭 방식을 제안하였다. 결합 계수가 0.95일 때 기존 플라이백 스위칭의 경우, 약 68%의 낮은 에너지 전달 효율을 갖지만 제안한 플라이백 스위칭 방식을 사용할 경우, 기존 방식보다 약 28% 향상된 96%의 높은 에너지 전달 효율을 갖게 된다. 또한, 에너지 전달 효율 증가로 인해 밸런싱 속도도 기존에 비해 약 1.4배 증가한 것을 셀 밸런싱 실험을 통해 검증하였다. 새로운 스위칭 방식에 따른 에너지 전달 효율 개선은 1 W 프로토타입 셀 밸런싱 회로를 이용해 검증하였다.

References

- [1] J. Kim, J. Shin, C. Chun, and B. H. Cho, "Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing," *2012 IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, pp. 411-424, Jan. 2012.
- [2] M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-7, Oct. 2011.
- [3] J. Qi and D. D. C. Lu, "Review of battery cell balancing techniques," in *Proceedings of the Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6, Sep. 2014.
- [4] M. Y. Kim, C. H. Kim, J. H. Kim, D. Y. Kim, and G. W. Moon, "Switched capacitor with chain structure for cell-balancing of lithium-ion batteries," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2994-2999, Dec. 2012.
- [5] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in *Proc. IEEE 1997 Applied Power Electronics Conference*, pp. 848-854, Feb. 1997.
- [6] Z. Zhou, Y. Shang, B. Duan, and C. Zhang, "An any-cell(s)-to-any-cell(s) equalizer based on bidirectional inductor converters for series connected battery string," in *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 2511-2515, Oct. 2016.
- [7] J. Xu, S. Li, C. Mi, Z. Chen, and B. Cao, "SOC based battery cell balancing with a novel topology and reduced component count," *Energies*, pp. 2726-2740, May. 2013.
- [8] S. J. Lee, M. Kim, J. W. Baek, and J. H. Jung, "Transformer design methodology to improve transfer efficiency of balancing current in active cell balancing circuit using multi-winding transformer," *The Transactions of the Korea Institute of Power Electronics*, Vol. 23, No. 4, pp. 247-255, Aug. 2018.

**이상중(李相中)**

1990년 2월 12일생. 2015년 금오공과대 전자공학부 졸업. 2015년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 석·박통합과정.

**김명호(金明浩)**

1984년 1월 16일생. 2006년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2008년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2013년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(공학). 2013년~2015년 삼성중공업 기전팀 근무. 2016년~현재 한국전기연구원 전력변환연구센터 선임연구원. 당 학회 편집위원.

**백주원(白周元)**

1967년 1월 2일생 1990년 경북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2004년 Virgini Tech 방문연구원. IEEE 정회원. 현재 한국전기연구원 HVDC연구본부 전력변환연구센터장. 당 학회 산학협동이사.

**정지훈(鄭智勳)**

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공과대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학). 2006년~2009년 삼성전자 프린팅사업부 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 기획이사. IEEE Senior Member