

# 빠른 전하 균일화를 위한 새로운 구조의 셀 밸런싱 회로

박동진<sup>1</sup>, 최시영<sup>1</sup>, 김용욱<sup>1</sup>, 김래영<sup>†</sup>

## A Novel Cell Balancing Circuit for Fast Charge Equalization

Dong-Jin Park<sup>1</sup>, See-Young Choi<sup>1</sup>, Yong-Wook Kim<sup>1</sup>, and Rae-Young Kim<sup>†</sup>

### Abstract

This study proposes an improved cell balancing circuit for fast equalization among lithium-ion (Li-ion) batteries. A simple voltage sensorless charge balancing circuit has been proposed in the past <sup>[1]</sup>. This cell balancing circuit automatically transfers energy from high-to low-voltage battery cells. However, the circuit requires a switch with low on-resistance because the balancing speed is limited by the on-resistance of the switch. Balancing speed decreases as the voltage difference among the battery cells decrease. In this study, the balancing speed of the cell balancing circuit is enhanced by using the auxiliary circuit, which boosts the balancing current. The charging current is determined by the nominal battery cell voltage and thus, the balancing speed is almost constant despite the very small voltage differences among the batteries. Simulation results are provided to verify the validity of the proposed cell balancing circuit.

**Key words:** Lithium-ion battery, SOC(State of Charge), Balancing current, Symmetrical multi-winding transformer

### 1. 서 론

최근 화석연료의 고갈위기 및 이산화탄소 배출로 인한 지구온난화 문제가 점점 심각해지고 있는 가운데, 각국 정부들은 이를 해결하기 위한 환경 규제들을 강화하고 있다. 이에 맞물려 EVs(Electric Vehicles), HEV(Hybrid Electric Vehicle) 및 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)와 같은 친환경적인 전기자동차에 대한 관심은 높아지고 있는데, 이러한 응용 분야에서 리튬이온 배터리는 에너지 밀도와 단일 셀 전압이 높고 자기방전율이 낮은 특성을 가지고 있어, 타 2차 전지 대비 경제성이 높아 널리 사용되는 추세이다<sup>[2]</sup>.

리튬이온 배터리는 전기자동차와 같은 고전압 응용

시스템을 구동시키기 위해 약 100여개의 배터리 셀을 서로 직렬로 연결하여 대용량화(배터리 팩)를 이루게 되는데, 이는 긴 주행거리 및 전기 모터 등으로 구성된 전기 자동차 전장품 시스템에 적합한 크기의 구동 전압을 확보하기 위함이라 할 수 있다. 직렬로 연결된 배터리 셀들은 각각의 전기적, 화학적 특성 및 셀 주위 환경이 다르기 때문에 배터리 셀들 간의 전하 불균일 현상이 일어날 수 있다. 이는 충전, 방전 사이클이 반복되는 시점부터 더욱 심화되어 배터리팩 전체 수명을 급격히 감소시키고, 과충전시 화재나 폭발의 위험성을 초래한다. 그러므로 반드시 전하 균일 장치를 통해 각 배터리 셀의 전압(또는 용량)의 밸런싱이 이루어지도록 제어해 주어야만 하며, 이를 통해 전체 배터리의 안전성을 확보하고, 배터리의 수명을 연장시킬 수 있다.

지금까지 수많은 셀 밸런싱 회로들이 소개되었으며<sup>[1]</sup>, <sup>[3]-[13]</sup>, 이는 회로 특성에 따라 크게 수동형 밸런싱 방법과 능동형 밸런싱 방법으로 분류할 수 있다. 수동형 셀 밸런싱 회로<sup>[3]</sup>는 전반적인 시스템의 에너지 효율이 낮고, 발생된 열로 인해 추가적인 문제가 발생한다. 반면 능동형 셀 밸런싱 회로<sup>[1],[4]-[13]</sup>는 효율이 높고, 열로 인한 문제가 없다.

Paper number: TKPE-2015-20-2-8

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

<sup>†</sup> Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical and Biomedical Eng., Hanyang University  
Tel: +82-2-2220-2897 Fax: +82-2-2290-4825

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., EECS lab., Hanyang University  
Manuscript received Oct. 7, 2014; accepted Mar. 2, 2015

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

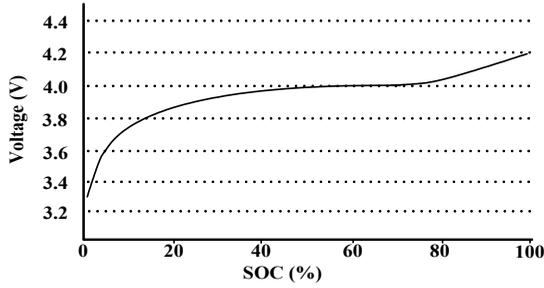


Fig. 1. Open cell voltage of lithium polymer battery.

능동형 셀 밸런싱 회로는 전하 전달 방식에 따라 간접 전달 방식<sup>[4]-[6]</sup>과 직접 전달 방식<sup>[1], [7]-[15]</sup>으로 나눌 수 있다. 간접 전달 방식은 인접하지 않은 배터리 셀로의 직접적인 전하 전달이 불가능하여 직렬 연결하는 배터리 셀의 수에 비례하여 밸런싱을 위한 시간이 길어지는 단점이 있다. 직접 전달 방식은 인접하지 않은 배터리 셀로 직접적인 전하 전달이 가능하여 직렬 연결된 배터리 셀의 수와 관계없이 빠른 균일화 속도를 낼 수 있다. 직접 전달 방식은 각 배터리 셀당 개별 컨버터를 연결하여 사용하는 방법<sup>[7]-[11]</sup>과 다권선 변압기를 이용하여 하나의 코어를 여러 개의 배터리 셀이 공유하여 사용하는 방법<sup>[1], [12]-[15]</sup>으로 나눌 수 있다. 개별 컨버터를 이용하는 방식은 배터리 셀의 충방전 속도는 매우 빠르지만, 배터리 수와 비례하여 시스템의 크기 및 구현 비용이 증가한다. 다권선 변압기를 이용하는 경우 하나의 코어를 공유하는 변압기를 사용하므로 시스템의 크기를 크게 줄일 수 있다.

대칭 다권선 변압기를 이용한 기존의 셀 밸런싱 회로는 배터리 셀 SOC(State Of Charge)를 정확히 측정하는 센서를 사용하지 않고, 배터리 셀 전압의 차이를 이용하여 밸런싱을 이루는 회로로 스위칭 제어가 매우 간단하다<sup>[1], [14]-[15]</sup>. 하지만 이 경우 밸런싱 전류의 크기는 스위치 소자의 내부저항 등 전류 경로에 존재하는 전체 저항 값의 합에 의해 제한된다. 또한 전류의 크기는 셀 전압 차에 비례하므로, 셀 전압차가 작아질수록 전류의 크기가 감소하여 밸런싱 속도는 느려지게 되는 단점이 있다.

EVs(Electric Vehicles)나 HEV (Hybrid Electric Vehicle) 시스템은 회생제동과 같은 큰 과도 상태를 가지며, 이 경우 느린 밸런싱 속도는 특정 셀의 과충전을 야기할 수 있으며, 최근 확대되고 있는 고속충전의 경우도 마찬가지이다. 그림 1은 리튬폴리머 배터리의 개방전압 특성곡선을 나타내는 그림으로, 40%~80% SOC 영역에서는 개방전압의 차이가 미미하며, HEV와 같이 이 영역에서 주로 동작하는 시스템의 경우에는 작은 전압차에 의해 밸런싱 속도가 매우 느려지는 문제점도 발생한다.

본 논문에서는 앞선 문제를 해결하기 위해 새로운 셀 밸런싱 회로를 제안하였다. 제안한 셀 밸런싱 회로는

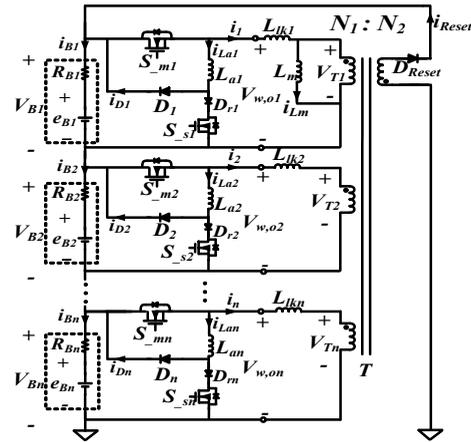


Fig. 2. Proposed cell balancing circuit.

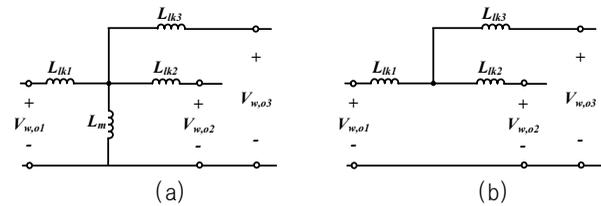


Fig. 3. Equivalent circuit of multi-winding transformer.

- (a) Equivalent circuit with magnetizing inductance
- (b) Simplified equivalent circuit.

보조 회로를 이용하여, 밸런싱 전류를 부스트-업 시킨 후 에너지를 전달하는 방식으로 밸런싱 속도를 높였다. 이에 스위치의 온-저항에 의한 영향이 작아져 스위치 소자 선정이 용이하며, 배터리 셀들의 전압차가 작더라도 거의 일정한 크기의 밸런싱 전류를 유지할 수 있다. 스위치의 제어는 셀 SOC를 정확히 측정하여 복잡한 스위칭 제어를 하는 대신 비교기와 플립플롭 및 게이트 소자를 이용하여 자동적으로 제어가 이루어지도록 설계하였다.

## 2. 제안한 셀 밸런싱 회로

### 2.1 시스템의 구성

제안한 셀 밸런싱 회로는 그림 2와 같다.  $N$ 개의 배터리 셀은 하나의 다권선 변압기에 연결되어 있으며, 하나의 배터리 셀당 하나의 양방향 스위치( $S_{m1}$ ), 하나의 단방향 스위치( $S_{s1}+D_1$ ), 하나의 다이오드( $D_1$ ), 하나의 보조 인덕터( $L_{a1}$ )로 회로를 구성한다.

다권선 변압기( $T$ )는 한 개의 자화 인덕턴스( $L_m$ ), ( $N_1 : N_2=1:N$ )의 권선비를 갖는 이상 변압기로 구성한다. 다권선 변압기의 이차 측에는 변압기의 포화를 방지하기 위해 다이오드( $D_{Reset}$ )를 이용해 변압기 리셋 회로를 구성하였으며, 이는 배터리 스트링에 연결하여 리셋 되는 자화 에너지가 배터리로 환류 하도록 설계하였다.

배터리는 배터리의 특성을 나타내기 위해 내부저항

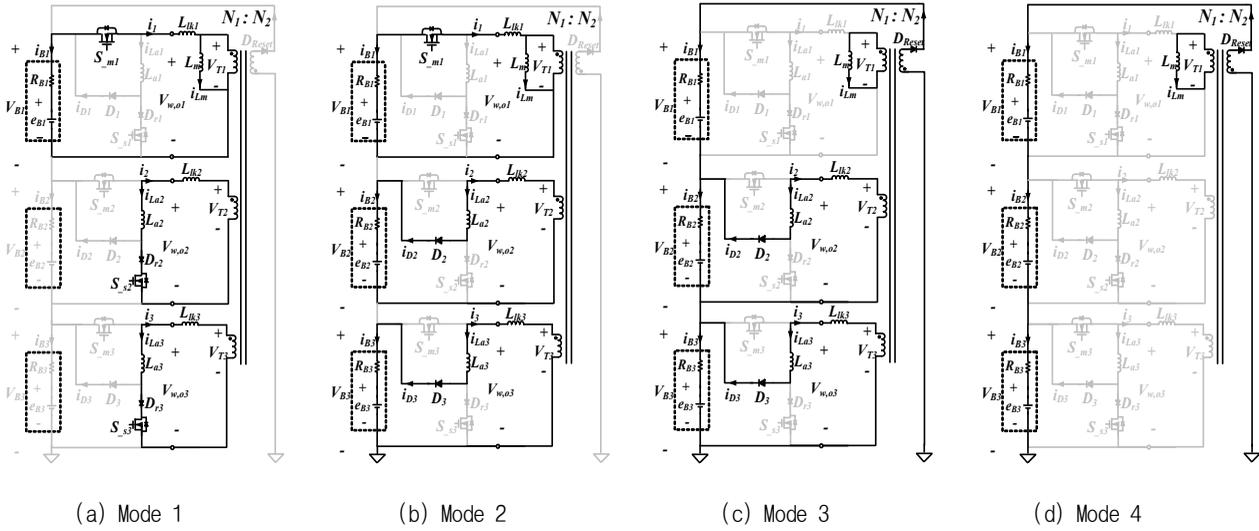


Fig. 4. Operation mode of proposed cell balancing circuit.

$(R_{Bn})$ 과 전압 전위( $e_{Bn}$ )을 갖는 모델링 방법으로 구성하였다.

## 2.2 동작모드 분석

동작모드 분석을 간략화 하기 위해, 다음과 같은 4개의 가정을 한다.

- 1) 배터리 스트링( $V_{string}$ )은 총 세 개의 배터리 셀이 직렬로 연결되어 있다.
- 2) 다권선 변압기는 대칭적으로 설계되어 1차 측 권선의 권선비는 1:1:1로 모두 동일( $V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_T$ )하며, 각 단자의 누설 인덕턴스 값 또한 동일 ( $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$ )하다.
- 3) 누설 인덕턴스( $L_k$ )는 자화 인덕턴스( $L_m$ )에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다.
- 4) 배터리 셀 초기 전압 :  $V_{B1} > V_{aver}$  (배터리 셀 평균전압)  $> V_{B2} > V_{B3}$

다권선 변압기의 등가회로는 그림 3.(a)와 같이 다수의 권선이 커플링 되어 있는 회로로 나타낼 수 있다. 이는 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스에 비해 매우 작다고 가정하면, 그림 3.(b)와 같이 간략화 할 수 있다<sup>[12]</sup>. 스위칭 한 주기 동안의 동작모드는 그림 4와 같이 총 네 개의 모드를 갖는다. 각 동작모드에 따른 이론적인 파형은 그림 5에서 보여준다.

**(a) 모드 1 ( $t_0 - t_1$ ) :**  $t_0$  시점에서 주 스위치 1 ( $S_{m1}$ )과 보조 스위치 2, 3 ( $S_{s2}, S_{s3}$ )이 켜지고, 1번 배터리에서 변압기 방향으로 방전전류  $i_1$ 이 흐르는데, 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{B1} - V_T(t) = (r_{on} + L_k \frac{d}{dt}) i_1(t) \quad (1)$$

여기서  $r_{on}$ 은 스위치의 온-저항을 나타내며, 변압기에서 2, 3번 배터리 측 보조 회로로 흐르는 전류( $i_{La2}$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_T(t) - V_{Fr} &= (r_{on} + (L_k + L_{a2}) \frac{d}{dt}) i_{La2}(t) \\ &= (r_{on} + (L_k + L_{a3}) \frac{d}{dt}) i_{La3}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $V_{Fr}$ 은 단방향 스위치 다이오드  $D_{rn}$ 의 문턱전압을 나타내며, 보조 인덕터 값을 모두 동일하게 설정한다면( $L_{a1} = L_{a2} = L_{a3} = L_{am}$ ), 보조 회로로 흐르는 전류가 모두 동일함을 알 수 있다. 방전 전류와 보조 회로로 흐르는 전류 사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_1(t) = -i_2(t) - i_3(t) = i_{La2}(t) + i_{La3}(t) \quad (3)$$

$$\frac{i_1(t)}{k} = i_{La2}(t) = i_{La3}(t) = i_{ch}(t) \quad (4)$$

( $k$  : 보조 회로가 도통되는 수)

식(1)-(4)을 정리하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있으며, 이를 통해 보조 인덕터를 통해 흐르는 전류  $i_{ch}$ 가 1번 배터리 전압, 즉 가장 많이 충전되어 있는 배터리에 의해 증가됨을 알 수 있다.

$$V_{B1} - V_{Fr} = i_{ch}(t) \left[ 3r_{on} + (L_{am} + 3L_k) \frac{d}{dt} \right] \quad (5)$$

**(b) 모드 2 ( $t_1 - t_2$ ) :**  $t_1$  시점에서 보조 스위치 2, 3이 켜지면 보조 인덕터로 흐르는 전류  $i_{La2}, i_{La3}$ 에 의해 보

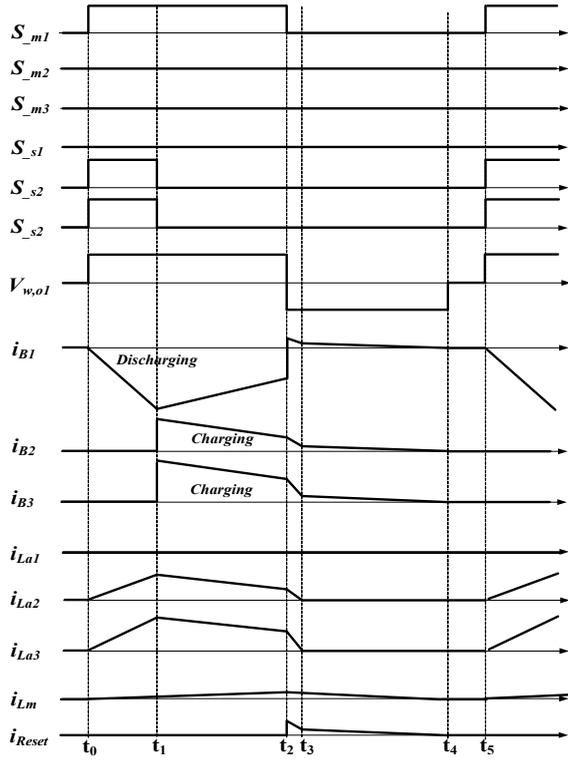


Fig. 5. Waveform of the proposed balancing circuit.

조 다이오드 2, 3( $D_2, D_3$ )이 도통된다. 이는 평균보다 적게 충전된 배터리로 흐르게 되는데, 회로에 흐르는 전류를 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} V_{B1} - V_T(t) = i_1(t)(r_{on} + L_{lk} \frac{d}{dt}) \\ V_T(t) - V_{B2} - V_F = i_{La2}(t)(L_{lk} + L_{an}) \frac{d}{dt} \\ V_T(t) - V_{B3} - V_F = i_{La3}(t)(L_{lk} + L_{an}) \frac{d}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $V_F$ 는 보조 다이오드  $D_n$ 의 문턱전압을 의미하며, 앞서 정의한 식 (3)과 (6)식을 정리하면 보조 인덕터로 흐르는 전류  $i_{Lan}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{Lan}(t) = i_{Lan}(t_1) + i_{Lan}(t - t_1) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{La2}(t - t_1) \\ i_{La3}(t - t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{on} + (2L_{lk} + L_{an}) \frac{d}{dt} & r_{on} + L_{lk} \frac{d}{dt} \\ r_{on} + L_{lk} \frac{d}{dt} & r_{on} + (2L_{lk} + L_{an}) \frac{d}{dt} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{B1} - V_{B2} - V_F \\ V_{B1} - V_{B3} - V_F \end{bmatrix} \quad (8)$$

(c) 모드 3 ( $t_2 - t_3$ ) :  $t_2$  시점에서 주 스위치 1이 꺼지면, 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 단자

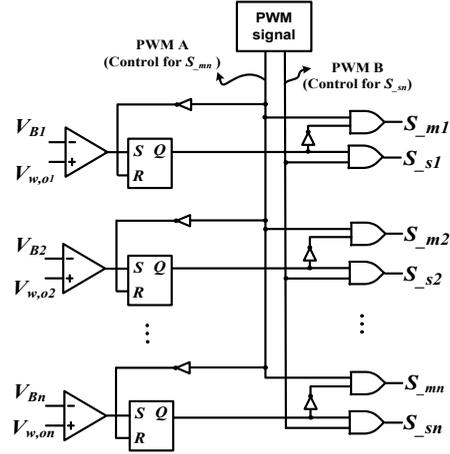


Fig. 6. Circuit to operate the auxiliary switching.

에 유도된다. 자화 인덕터 전류  $i_{Lm}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{Lm}(t) = i_{Lm}(t_2) + \frac{V_T}{L_m}(t - t_2) = i_{Lm}(t_2) - \frac{\frac{N_1}{N_2} V_{string}}{L_m}(t - t_2) \quad (9)$$

보조 인덕터에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{Lan}(t) = i_{Lan}(t_2) - \frac{\frac{N_1}{N_2} V_{string} + V_{Bn} + V_F}{L_{an} + L_{lk}}(t - t_2) \quad (10)$$

이 구간 동안 회로에 흐르는 전류 사이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{N_1}{N_2} [i_{Lm}(t) + i_{La2}(t) + i_{La3}(t)] - i_{Reset}(t) = 0 \quad (11)$$

배터리에 흐르는 전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} i_{B1}(t) = i_{Reset}(t) \\ i_{B2}(t) = i_{Reset}(t) + i_{La2}(t) \\ i_{B3}(t) = i_{Reset}(t) + i_{La3}(t) \end{cases} \quad (12)$$

식 (11)을 식 (12)에 대입하여 정리하면, 배터리로 흐르는 전류를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{cases} i_{B1}(t) = \frac{N_1}{N_2} [i_{Lm}(t) + i_{La2}(t) + i_{La3}(t)] \\ i_{B2}(t) = i_{La2}(t) + \frac{N_1}{N_2} [i_{Lm}(t) + i_{La2}(t) + i_{La3}(t)] \\ i_{B3}(t) = i_{La3}(t) + \frac{N_1}{N_2} [i_{Lm}(t) + i_{La2}(t) + i_{La3}(t)] \end{cases} \quad (13)$$

(d) 모드 4 ( $t_3 - t_4$ ) :  $t_3$  시점이 되면 보조 인덕터 전류  $i_{La2}, i_{La3}$ 는 모두 0으로 수렴한다. 자화 인덕터 전류  $i_{Lm}$ 은 식(14)와 같이 표현할 수 있으며, 이는 모드 4 구간 동안 계속해서 감소하여  $t_4$  시점에서 0으로 수렴한다.

$$i_{Lm}(t) = i_{Lm}(t_3) - \frac{N_1}{N_2} \frac{V_{string}}{L_m} (t - t_3) \quad (14)$$

구간( $t_4 - t_5$ )동안 제안한 회로에 전류가 흐르지 않는 데, 이는 불연속 도통 모드(DCM)에서 회로가 동작한다는 사실을 의미한다.  $t_5$  시점에서는 다음 스위칭 주기의 모드 1로 돌아간다.

### 2.3 제어 방법

그림 6은 제안한 셀 밸런싱 회로의 제어 회로 구성을 보여준다. 모든 배터리 셀 SOC를 정확히 측정된 후 복잡한 알고리즘을 통해 스위치의 제어를 해주는 회로와 달리 제안한 셀 밸런싱 회로는 각 권선 출력전압 ( $V_{w,on}$ )을 배터리 전압( $V_{Bn}$ )과 비교하여 스위치의 온-오프를 제어한다. 만약 각 권선의 출력 전압으로 배터리 셀들의 평균 전압이 유도 된다 가정<sup>[11],[14]</sup>하면 평균전압보다 큰 배터리 측 회로는 주 스위치가 일정 시간( $t_0 - t_2$ )동안 턴-온 될 것이고, 평균전압보다 낮은 배터리 측 회로는 보조 스위치가 일정 시간( $t_0 - t_1$ )동안 턴-온 되어 그림 5와 같이 스위치의 온-오프 제어를 할 수 있다. 이는 다 권선 변압기의 누설 인덕턴스를 최소화시키고, 변압기가 대칭적 전달 특성을 갖도록 설계함으로 가능하다.

## 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 3.1 시뮬레이션

제안한 전하 균일 장치의 유효성을 검증하기 위해 표 1에 정리된 파라미터를 이용하여 비교 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 PSIM 9.0 simulation tool을 이용하였으며, 배터리 셀은 전체 시뮬레이션 시간을 단축시키기 위해 커패시터[0.1F]로 대체하여 시뮬레이션을 실시하였다. 실험에는 3000mAh의 셀이 사용되었으며, 이는 약 4000[F]의 정전용량에 해당된다.

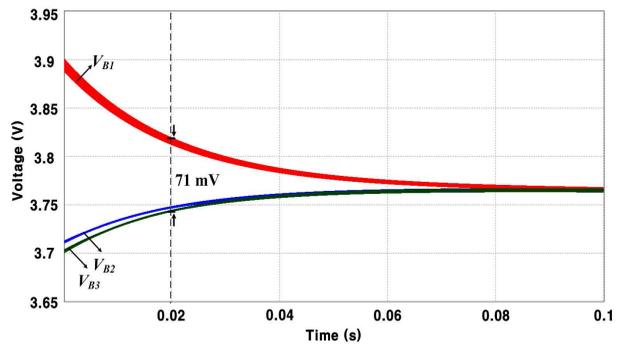
그림 7은 PSIM 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 파형으로 그림 7.(a)의 기존 밸런싱 회로와 그림 7.(b)의 제안한 밸런싱 회로를 이용하여 배터리 셀들의 밸런싱을 맞출 때의 셀 전압 파형을 보여준다. 이를 통해 동일한 조건에서 기존의 밸런싱 회로보다 제안한 회로의 밸런싱 속도를 통해 더 빠른 밸런싱이 가능한 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 실험결과

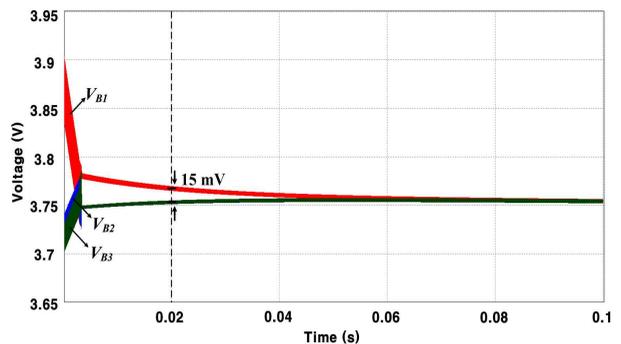
제안한 회로의 유효성 검증을 위해 그림 8과 같은 실

TABLE I  
SIMULATION PARAMETER

	Symbol	Comment	Value
Conven-tional circuit	$V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}$	Battery voltage	3.9 [V] 3.71 [V] 3.7 [V]
	$R_{Bn}$	Battery internal resistance	5 [mΩ]
	$R_{on}$	Switch turn on resistance	50 [mΩ]
	$L_m$	Magnetizing inductance of the transformer	300 [uH]
	$L_{lk}$	Leakage inductance of the transformer	0.3 [uH]
	$N_1 : N_2$	Turn ratio of the transformer	1 : 3
Auxiliary circuit	$V_{Fn}$	Diode forward voltage	0.5 [V]
	$L_{an}$	Auxiliary inductance	1 [uH]
	$f_s$	Switching frequency	50 [kHz]



(a) Conventional balancing circuit



(b) Proposed balancing circuit

Fig. 7. Simulation result using PSIM 9.0.

험 회로를 제작하였고, 제안한 회로의 실험 파형을 그림 9에서 볼 수 있다. 제안한 회로는 그림 9.(a), (b)와 같이 배터리 셀의 충전된 양에 따라 다른 스위치 제어를 실시한다. 그림 9.(a)는 주 스위치 게이트 신호로써 평균보다 많이 충전된 배터리 측(1번 배터리)만을 턴-온 시켜준다. 그림 9.(b)는 보조 스위치의 게이트 신호로써 평균보다 적게 충전된 배터리 측(2, 3번 배터리)을 일정시간

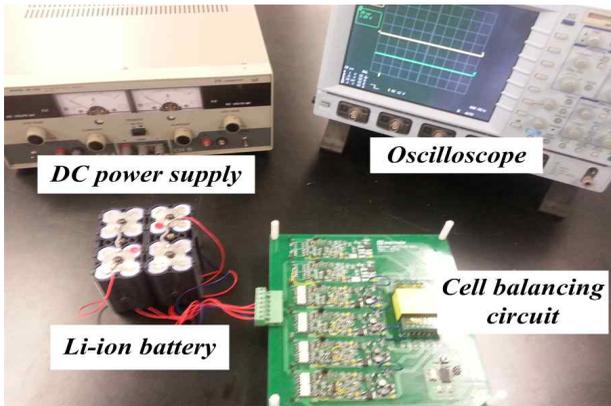
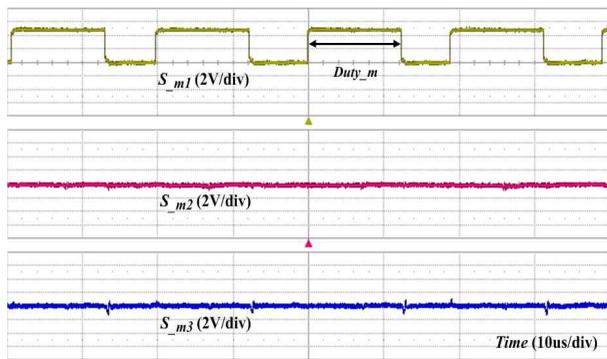
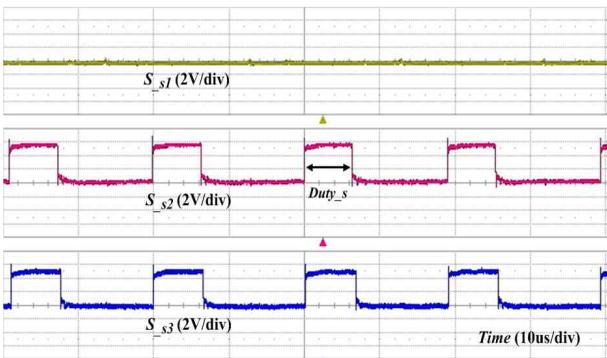


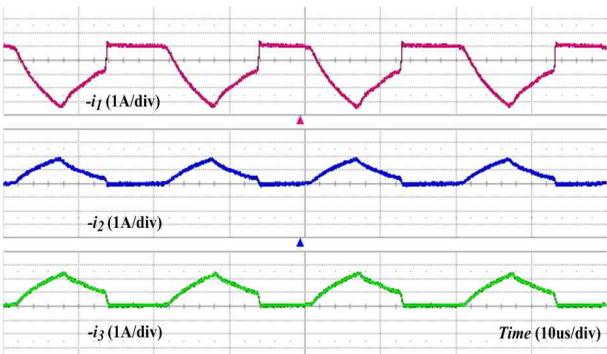
Fig. 8. Test board with lithium ion battery.



(a) The gate signals for main switches



(b) The gate signals for auxiliary switches



(c) The winding currents of a multi-winding transformer

Fig. 9. Experimental waveform of the balancing circuit.

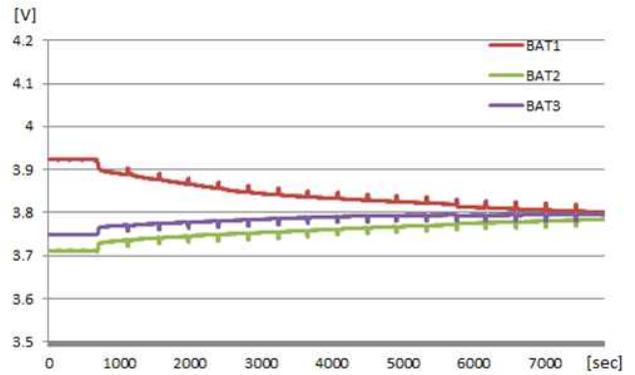


Fig. 10. Experimental result of the balancing circuit.

동안 턴-온 시켜준다. 그림 9.(c)은 제안한 회로의 밸런싱 전류 파형으로써 전류가 부스트-업 되어 큰 밸런싱 전류가 흐르는 것을 살펴볼 수 있다.

그림 10은 정전류[1A] 충전 중 제안한 전하 균일 장치의 셀 밸런싱 결과를 보여준다. 실험용 배터리 셀은 3000mAh Samsung ICR 18650-30 전지를 사용하였다. 셀 전압 차이는 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 배터리 셀 간의 밸런싱이 이루어지고 있음을 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 대칭 다권선 변압기를 이용한 향상된 셀 밸런싱 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 배터리 셀 전압의 크기에 따라 다른 스위치 온-오프 제어를 해주며, 이는 배터리 셀 SOC를 정확히 측정하여 스위치의 온-오프를 선택적으로 제어하는 일반적인 방법과 달리 대칭 다권선 변압기와 비교기, 플립플롭 및 게이트 소자를 이용해 제어 회로를 구현함으로써 스위치를 선택적으로 제어해 줄 수 있다. 또한 기존 논문에서와 다른 에너지 전달 방식을 이용하여 스위치의 온-저항과 상관없이 빠른 밸런싱 속도를 얻을 수 있다. 따라서 기존 논문과 비교하였을 때, 온-저항이 비교적 큰 일반적인 규격의 스위치를 선정하면서도 빠른 밸런싱 속도로 배터리 셀들의 균일화를 이룰 수 있다.

#### References

[1] C. S. Lim, K. J. Lee, N. J. Ku, D. S. Hyun, and 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, Apr. 2014.

[2] C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proc. IEEE*, Vol. 95, No. 4, pp. 704-718, Apr. 2007.

- [3] S. W. Moore and P. J. Schneider, "A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems," in *Proc. SAE World Congr., Detroit, MI, USA*, 2001.
- [4] A. Baughman and M. Ferdowsi, "Double-tiered switched capacitor battery charge equalization technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2277 - 2285, Jun. 2008.
- [5] N. H. Kutkut, "A modular non-dissipative current diverter for EV battery charge equalization," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron., conf.*, Vol. 2, pp. 686-690, 1998.
- [6] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, and I. S. Tsai, "Charge equalization for series connected batteries," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 39, No. 2, pp. 704-710, Apr. 2003.
- [7] C. Kamjanapiboon, K. Jirasereamornkul, and V. Monyakul, "High efficiency battery management system for serially connected battery string," in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., Seoul, Korea*, pp. 1504 - 1509, Jul. 2009.
- [8] C. H. Kim, H. S. Park, C. E. Kim, G. W. Moon, and J. H. Lee, "Individual charge equalization converter with parallel primary winding of transformer for series connected lithium-ion battery strings in an HEV," *Journal of Power Electronics*, Vol. 9, No. 3, pp. 472-480, May 2009.
- [9] S. T. Hung, D. C. Hopkins, and C. R. Mosling, "Extension of battery life via charge equalization control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 40, No. 1, pp. 96 - 104, Feb. 1993.
- [10] C. H. Kim, M. Y. Kim, and G. W. Moon, "A modularized charge equalizer using a battery monitoring IC for series connected lithium-ion battery strings in electric vehicle," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 8, pp. 3779-3787, Aug. 2013.
- [11] J. Xu, S. Li, and C. Mi, "SOC based battery cell balancing with a novel topology and reduced component count," *Energies*, pp. 2726-2740, June 2013.
- [12] 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, pp. 235 - 246, Jan. 1998.
- [13] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 1, pp. 28-35, Jan./Feb. 1999.
- [14] C. S. Lim, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, "Battery voltage sensorless charge equalizer using the multi-winding transformer," *IEEE Vehicle Power and Propuls. Conf.*, pp. 789-793, Oct. 9-12, 2012.
- [15] S. Li, C. C. Mi, and M. Zhang, "A high-efficiency active battery balancing circuit using multi-winding transformer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, No. 1, pp. 198-207, Jan./Feb. 2013.



### 박동진(朴東鎭)

1987년 9월 29일생. 2013년 한양대 전자정보시스템공학과 졸업. 2015년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).



### 최시영(崔時榮)

1973년 6월 11일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~2006년 효성중공업 연구소 선임연구원. 2006년~2014년 삼성전자 책임연구원. 2014년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



### 김용욱(金容燾)

1977년 1월 24일생. 2002년 한양대 제어계측공학과 졸업. 2004년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2011년~현재 한양대 전기공학과 대학원 박사과정. 2004년~현재 삼성전자 생활가전 사업부 디지털제어 Lab. 책임연구원.



### 김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1977년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 버지니아 공대(Virginia Tech) 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2004년 효성중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Post Doc. Researcher. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 조교수. 당 학회 JPE 편집위원, 학술위원.