

# 고전압 배터리 스택을 위한 플라이백 방식의 새로운 배터리 이퀄라이저

김형석 박기범 박상현 문건우 윤명중

카이스트

## A New Flyback Battery Equalizer for High Voltage Battery Stacks

Hyoung-Suk Kim, Ki-Bum Park, Sang-Hyun Park, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn  
KAIST

### 요약

본 논문에서는 전류 불연속 모드(DCM)로 동작하는 두 개의 스위치를 가지는 플라이백 컨버터(Two Switch Flyback)를 응용한 배터리 이퀄라이저(Battery Equalizer)를 제안한다. 제안된 배터리 이퀄라이저는 스위치와 다이오드를 공통으로 사용해 추가되는 능동 소자의 수를 최소화 한다. 또한 스위치 양단의 전압 스트레스를 배터리 스택(stack) 전압으로 제한 시켜 낮은 정격 전압을 가지는 스위치를 사용 가능하게 하여 가격을 줄이고 효율을 높인다. 이론적 분석과 실험을 통해 제안한 배터리 이퀄라이저의 성능을 검증한다.

### 1. 서론

직렬 연결된 배터리 스택(stack)은 하이브리드 전기 자동차(HEV), 무정전 전원공급장치(UPS), 태양광발전(PV) 등 산업의 많은 분야에서 사용하고 있으며, 점점 고전압의 배터리 스택이 요구되고 있는 추세이다. 배터리를 직렬로 연결해 사용할 경우 배터리 셀 간의 특성, 동작 환경 등의 차이로 인해 셀간의 불균형이 발생하게 되고, 배터리 수명과 신뢰성에 영향을 미친다. 따라서 각각 배터리 셀의 전압을 균등하게 유지시켜 수명을 늘리고 신뢰성을 보장하기 위해 배터리 이퀄라이저가 필요하게 된다.

배터리 셀의 전압을 균등하게 유지하는 간단한 방법으로 각 배터리 셀에 병렬로 저항을 달아 분류회로를 만들어 주는 유손실 배터리 이퀄라이저가 있다. 이 경우 바이패스 저항에 의한 손실이 크며, 바이패스 저항을 흐르는 전류를 조절하지 못하므로 정확한 전압 균등화가 어렵다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법인 배터리 양단에 병렬로 스위치를 달아 바이패스 저항을 흐르는 전류를 제어하는 ICE(Individual Cell Equalizer)방식은 정확한 전압 균등화가 가능하지만 여전히 저항에 의한 손실을 가지게 된다.

이러한 유손실 배터리 이퀄라이저의 단점을 보완하여 저항에 의한 손실을 막고 정확한 전압 균등화를 위해 배터리 셀당 하나의 DC-DC 컨버터를 이용한 여러 가지 무손실 형태의 배터리 이퀄라이저가 제안 되었다. 그 대표적인 형태가 플라이백 방식의 배터리 이퀄라이저로 그림 1 (a)와 같다. 이 배터리 이퀄라이저는 그림 1 (b)와 같이 스위치가 꺼진 후 변압기 1차측의 누설 인덕턴스( $L_{lk}$ )와 스위치의 출력 커패시턴스( $C_{oss}$ ) 간의 공진으로 인해 스위치의 양단의 전압 스트레스가 커지는 문제점을 가지게 된다. 따라서 높은 정격 전압을 가지는 스위치를 사용하거나 여러 개의 스위치를 사용하게 되어 효율이 떨어지고 가격이 상승하는 문제점을 가지게 되어, 고전압

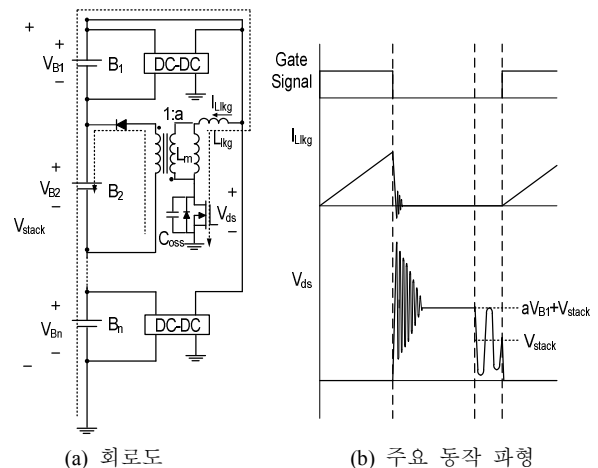


그림 1 기존의 플라이백 컨버터를 이용한 배터리 이퀄라이저

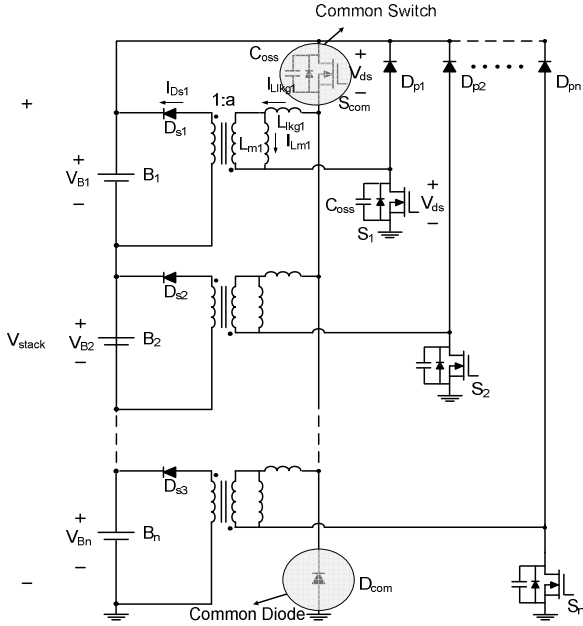
배터리 스택 이퀄라이저로 적합하지 않다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여, 추가되는 능동 소자의 수를 최소화 하고, 낮은 정격전압을 가지는 스위치를 사용함으로써 효율과 가격에서 이점을 가지는 새로운 플라이백 형태의 배터리 이퀄라이저를 제안한다.

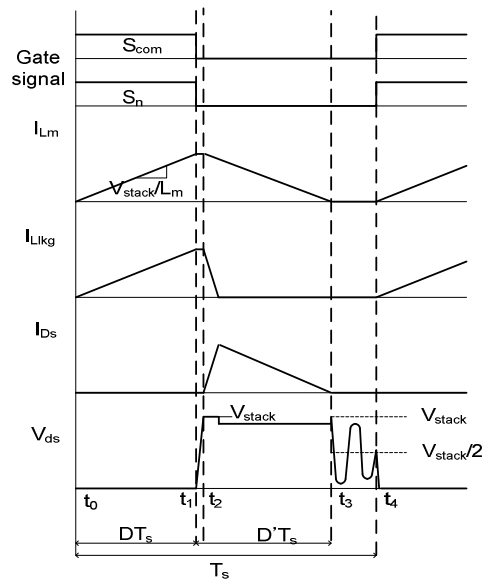
### 2. 제안된 배터리 이퀄라이저와 그 동작

#### 2.1 회로설명

제안된 배터리 이퀄라이저 회로는 Two-Switch Flyback Converter를 응용한 것으로 그 회로는 그림 2 (a)와 같으며 주요 파형은 그림 2 (b)와 같다. N개의 배터리 셀마다 각각 하나의 컨버터가 존재하며, 그림 2 (a)에서와 같이 스위치  $S_{com}$  과 다이오드  $D_{com}$ 을 공통으로 사용하여 각각에 Two-Switch Flyback Converter를 사용하는 것에 비해 스위치와 다이오드 수를 각각 N-1개 줄일 수 있다. 회로 동작은 다음과 같다. 우선 위에 공통으로 사용하는 스위치  $S_{com}$ 은 일정한 주기 일정한 시비율로 배터리 셀의 상태 상관없이 스위칭 한다. 각각의 배터리 셀의 전압을 센싱하여 각각 배터리 셀  $B_1, B_2 \dots B_n$ 에 연결된 컨버터의 아래쪽 스위치  $S_1, S_2 \dots S_n$ 의 켜지고 꺼짐을 결정하게 된다. 배터리의 셀의 전압이 기준 전압보다 낮게 되면 해당 컨버터의 아래쪽 스위치  $S_1, S_2 \dots S_n$ 을  $S_{com}$ 과 동기를 맞춰 켜주어 컨버터를 동작 시켜 에너지를 전체 배터리 스택으로부터 전압이 낮은 배터리 셀로 이동시켜 주며, 배터리의 전압이 기준 전압보다 높게 되면 기준 전압보다 높은 배터리 셀  $B_1, B_2 \dots B_n$ 에 연결된 컨버터의 아래 스위치  $S_1, S_2 \dots S_n$ 을 꺼주어 컨버터를 동작하지 않게 한다. 제안된



(a) 회로도



(b) 주요 동작 파형

그림 2 제안된 배터리 이퀄라이저

회로는 스위치가 꺼졌을 때 스위치 양단의 전압이 배터리 스택 전압으로 클램핑 되므로 스위치가 낮은 전압 스트레스를 가지고 스위치, 다이오드의 공유를 통해 전압 스트레스를 줄이기 위해 사용되는 능동 소자의 수를 최소화 하며, 정확한 전압 균등화가 가능하게 된다.

## 2.2 동작 분석

제안된 배터리 이퀄라이저 회로의 해석을 위해 그림 2 (a)에서 명시되지 않은 기생 성분은 모두 무시 하고, 배터리 B1의 전압  $V_{B1}$ 만 기준 전압보다 낮은 상태라고 가정한다. 기준 전압보다 낮은 전압을 가진 배터리 셀에 대해서만 해당하는 컨버터가 동작하므로 배터리 B1이 전체 배터리 스택으로부터 에너지를 전달 받는 과정에 대해 한 주기 동안 해석한다. 각 모드에 대한 전류 흐름은 그림 3에 나타나 있다.

### 1) 모드1( $t_0 \sim t_1$ )

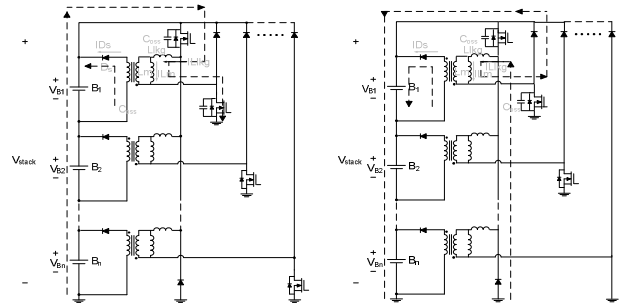
두 개의 스위치  $S_{com}$ 과  $S_1$ 이 동시에 켜져 자화 전류가  $V_{stack}/L_m$ 의 기울기를 가지고 증가하며 변압기에 에너지가 저장 된다.

### 2) 모드2( $t_1 \sim t_2$ )

두 개의 스위치  $S_{com}$ 과  $S_1$ 이 동시에 꺼지면 스위치의  $C_{oss}$ 가 충전된다. 배터리 셀이 연결된 변압기의 2차측에 투영된 전압이 셀 전압보다 크게 되면 2차측 다이오드가 켜지고,  $L_{kg}$ 와  $C_{oss}$  공진에 의해 스위치 양단의 전압이 상승한다. 스위치 양단의 전압이 배터리 스택의 전압보다 커지는 순간 스위치에 연결된 다이오드가 켜져 스위치 양단의 전압이 배터리 스택전압  $V_{stack}$ 으로 클램핑 된다.

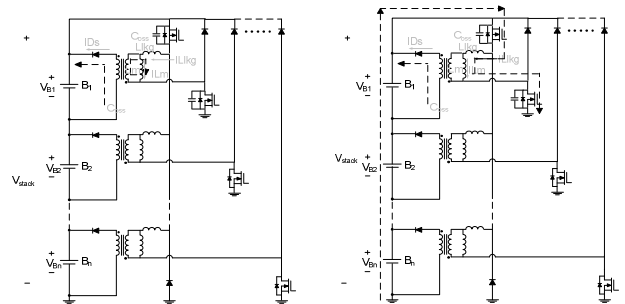
### 3) 모드3( $t_2 \sim t_3$ )

누설 인덕턴스( $L_{lkg}$ )와 자화 인덕턴스 ( $L_m$ )에 각각 걸리는 음전압에 의해  $L_m$ 전류와  $L_{lkg}$ 전류가 음의 기울기를 가지고 감소하며, 그 차이 전류가 턴 비로 인해 투영된 값이 2차측 배터리 셀로 흘러 배터리를 충전 시킨다.



(a)모드 1

(b)모드 2



(c)모드 3

(d)모드 4

그림 3 모드별 등가회로

### 4) 모드4( $t_3 \sim t_4$ )

자화 전류가 0이 된 순간부터  $L_m$  과  $C_{oss}$ 가 공진하고 스위치가 다시 동시에 켜지면 같은 과정을 반복한다.

## 3. 제안된 배터리 이퀄라이저의 변압기 설계

제안된 배터리 이퀄라이저의  $L_m$ 에 Volt-Sec 평형 조건을 적용하면 식 (1)과 같다.  $DT_s$ 와  $D'T_s$ 는 그림 2(b)에서 나타난 값이다.

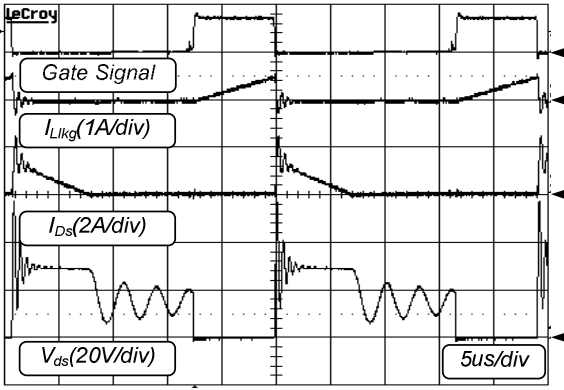


그림 4 기존의 배터리 이퀄라이저 실험 파형

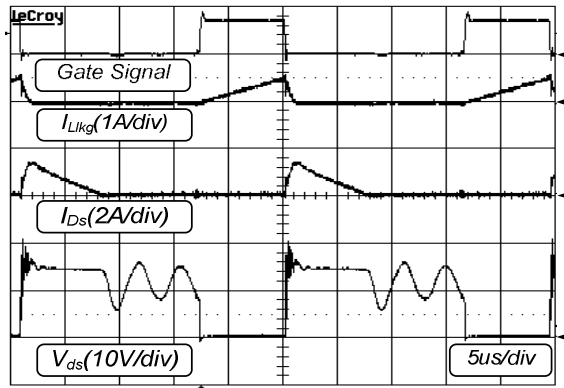


그림 5 제안된 배터리 이퀄라이저 실험 파형

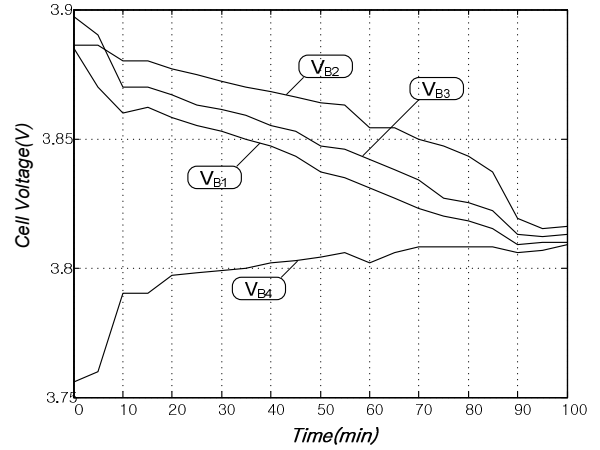


그림 6 배터리 전압 균등화 실험 결과

사용된 소자와 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 시스템 설계사양

$S_{com}, S_n$	FQP10N20	Turn ratio a	3.5
$D_{pn}, D_{com}$	31DQ03	Number of turns	2:7
$D_{sn}$	90SQ045	$L_m$	159uH
Core	PQ2016	$L_{lkg}$	1uH

그림 4는 기존의 플라이백 방식의 배터리 이퀄라이저의 실험 파형이고 그림 5는 제안된 배터리 이퀄라이저의 실험 파형이다. 기존 방식의 경우 스위치 양단에 배터리 스택 전압의 4배 정도의 전압 스트레스가 발생하는 것을 제안된 방식으로 1.5배 정도로 낮출 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 제안된 배터리 이퀄라이저를 이용한 전압 균등화 결과 파형이다. 시간이 지남에 따라 각 배터리 셀의 전압이 균등해 지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

기존의 플라이백 방식을 이용한 배터리 이퀄라이저는 스위치에 큰 전압 스트레스를 가진다. 본 논문에서는 소자의 공동사용으로 배터리 셀의 수(N) + 1 개의 다이오드와 하나의 스위치만을 추가하여 스위치 양단의 전압 스트레스를 낮출 수 있는 배터리 이퀄라이저를 제안하였다. 4개의 배터리를 통한 실험을 통해 기존의 플라이백 방식의 배터리 이퀄라이저와 제안된 배터리 이퀄라이저를 비교해 제안된 회로가 전압 스트레스를 효과적으로 낮추며 셀 전압의 균등화가 가능함을 확인하여 그 타당성을 검증하였다.

#### 참고문헌

[1] D. Linden, Editor (2nd edition.), Handbook of Batteries, McGraw Hill, New York (1995).  
 [2] N. H. Kutkut and D. M. Divan, "Dynamic equalization techniques for series battery stacks," in Proc. IEEE INTELEC '96, Boston, USA, Oct.1996, pp. 514-521.  
 [3] B. Lindemark, "Individual cellvoltage equalizers (ICE) for reliable battery performance," in Proc. IEEE INTELEC '91, Kyoto, Japan, Nov. 1991, pp. 196-201

$$V_{stack} DT_s = a V_{Bn} D' T_s \quad (1)$$

제안한 회로는 전류 불연속 모드(DCM)로 동작 하므로 변압기의 최소 턴비 a는 식 (2)와 같이 나타내어 진다.

$$a \geq \frac{V_{stack} DT_s}{V_{Bn} D' T_s} \quad (2)$$

스위치가 꺼졌을 때 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스에 인가 되는 전압은 식 (3)과 (4)로 각각 나타 낼 수 있다.

$$V_{Llkg} = a V_{Bn} - V_{stack} \quad (3)$$

$$V_{Lm} = -a V_{Bn} \quad (4)$$

변압기 2차측으로 전달되어 배터리를 충전하는 전류는 누설인덕턴스 전류와 자화 인덕턴스 전류의 차가 2차측으로 투영된 전류이므로 2차측의 배터리 셀로 변압기에 저장된 전력의 전달이 가능하기 위해 변압기 턴비는 식 (5)의 조건을 만족해야 한다.

$$a \leq \frac{V_{stack}}{V_{Bn} + \frac{L_{lkg} \cdot V_{Bn}}{L_m}} \quad (5)$$

#### 3. 실험 결과

제안한 배터리 이퀄라이저의 타당성을 검증하기 위해 3.7V, 2600mAh 리튬이온 전지 4개를 직렬로 연결하여 프로토타입 회로를 구성하여 실험을 수행하였다. 배터리의 초기 전압은  $V_{B1} = 3.885V$ ,  $V_{B2} = 3.886V$ ,  $V_{B3} = 3.897V$ ,  $V_{B4} = 3.756V$  이고 시비율  $D=0.4$  동작 주파수는 40kHz 이다.