

다권선 변압기의 자화 에너지를 이용한 모듈화 전하 균일 장치

임창순¹, 현동석¹, 김래영[†]

A Modularized Charge Equalizer Using the Magnetizing Energy of the Multi-Winding Transformer

Chang-Soon Lim¹, Dong-Seok Hyun¹, and Rae-Young Kim[†]

Abstract - The modularized equalizers normally use additional components among the modules in the long series-connected lithium-ion battery string. In these approaches, the overall systems are heavy, bulky, and high-priced. Furthermore, the losses related to additional components decrease the system efficiency. To avoid these problems, a modularized equalizer, which has no additional components among the modules, is required. This paper proposes a novel control scheme using the magnetizing energy of the multi-winding transformer for the module equalization. In this scheme, the high duty cycle is applied to the module where the voltage is higher than the reference voltage and the low duty cycle is applied to the module where the voltage is lower than the reference voltage. Due to the different duty cycle, more electric charges are transferred from high voltage module to the low voltage module during the turn-off switching interval. Using the proposed control scheme, the equalizer system does not suffer from the size, cost, and loss related to the modularization. The experimental results are provided to verify the effectiveness of the proposed modularized equalizer.

Keywords: modularized charge equalizer, multi-winding transformer, magnetizing energy

1. 서 론

리튬이온 배터리는 에너지 밀도가 크고, 자가 방전에 의한 전력손실이 적고, 기억효과를 나타내지 않는 장점을 가지고 있어, EVs(Electric Vehicles), HEVs(Hybrid Electric Vehicles), PHEVs(Plug-in Hybrid Electric Vehicles) 등 여러 응용분야에서 사용량이 증가되고 있다. 하지만 이러한 리튬이온 배터리는 높은 파워를 얻기 위해 많은 수의 배터리 셀을 직렬로 연결해야 된다. 동일한 공정에 의해 만들어진 리튬이온 배터리라 할지라도, 직렬로 연결되어진 각 배터리 셀은 서로 다른 화학적, 전기적인 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인하여 직렬로 연결되어진 배터리 셀은 배터리 충전, 방전에 의해서 전압 불균형 상태에 놓이게 된다. 불균형 배터리

상태는 에너지 저장 용량과 배터리 수명을 급격히 감소시킨다. 또한 불균형 상태가 심한 경우 화재나 폭발이 일어날 수도 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 직렬로 연결되어진 배터리 셀은 반드시 배터리 전하 균일 장치가 필요하다. 지금까지 여러 가지의 전하 균일 장치(회로와 알고리즘)가 제안되었다. 예를 들면, 단방향 DC/DC 컨버터^{[1]-[3]}, 양방향 DC/DC 컨버터^{[4]-[6]}, Switched 커패시터^{[7]-[10]}, 다권선 변압기를 이용한 컨버터^{[11]-[16]} 등이 있다. 이러한 전하 균일 장치는 길게 직렬로 연결되어진 배터리 스트링에서 많은 문제점을 가지고 있다. 맨 위에 배터리 셀부터 맨 아래쪽의 배터리 셀까지 에너지가 단계적으로 이동하기 때문에, 긴 균형화 시간, 부정확한 균형화, 복잡한 제어등의 문제점을 가지고 있다^{[11]-[10]}. 다권선 변압기를 이용하는 컨버터는 하나의 변압기에 많은 수의 배터리를 연결해야 하는 실행상의 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위해 모듈화 전하 균일 장치가 개발되었다^{[17]-[19]}. 길게 직렬로 연결되어진 배터리 스트링이 여러 모듈로 나누어지기 때문에, 모듈화 전하 균일 장치는 유연한 균형 장치 설계, 낮은 전압 스트레

Paper number: TKPE-2012-17-5-3 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Hanyang University
 Tel: +82-2-2220-0341 Fax: +82-2-2220-0570
¹ Dept. of Electrical Eng., Hanyang University
 Manuscript received Feb. 8, 2012; accepted July 16, 2012

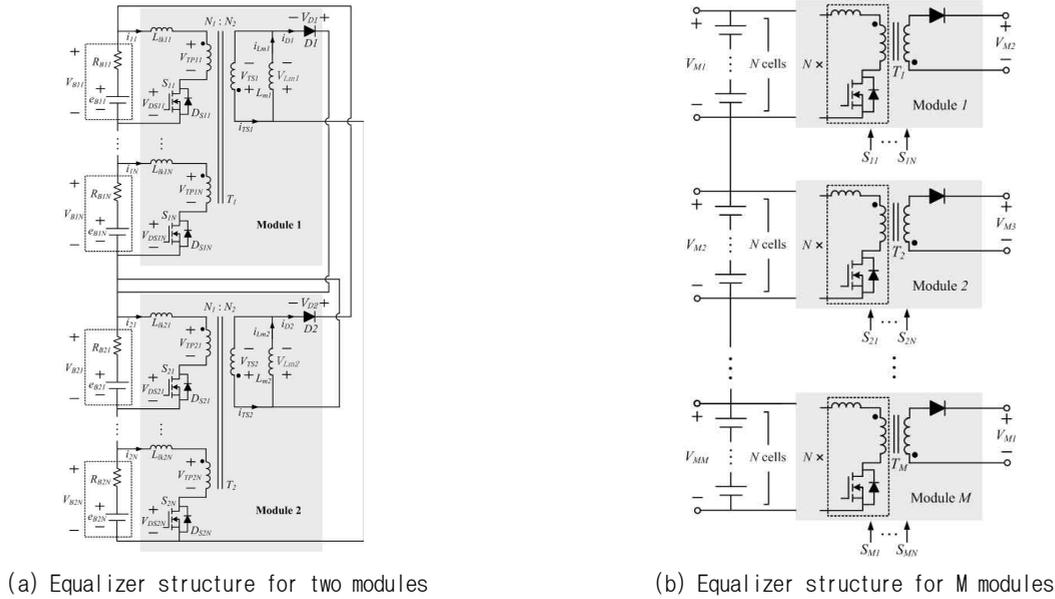


Fig. 1 System configuration of the proposed modularized charge equalizer

스, 빠른 시간에 균형화 가능 등 여러 장점을 가지고 있다. 하지만 모듈화 전하 균일 장치는 추가적인 장치(스위치, 인덕터, 변압기)들을 사용하여 배터리 모듈 사이의 전하를 균일하게 하였다. 이러한 접근 방식은 전체 시스템의 무게, 부피, 가격을 증가시킨다. 또한, 추가적인 장치에 관련된 손실이 발생하여 전체 시스템의 효율을 감소시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 추가적인 장치를 사용하지 않는 모듈화 전하 균일 장치가 요구되고 있다.

본 논문에서는 모듈 균일화를 위해서 다권선 변압기의 자화 에너지를 이용한 새로운 제어 방법을 제안하였다. 제안되어진 제어 방법을 사용하게 되면, 추가적인 장치를 사용하지 않기 때문에 모듈화와 관련된 크기, 가격, 손실로부터 영향을 받지 않는다. 제안되어진 균일 장치는 스위칭 한주기 동안에 배터리 셀과 모듈의 균일화를 위해서 작동된다. 즉, 모듈 안에 있는 배터리 셀 사이의 균일화는 스위치 턴-온 시에 배터리 전압 차이에 의해서 이루어지고, 배터리 모듈 사이의 균일화는 스위치 턴-오프 시에 다권선 변압기의 자화 에너지에 의해서 이루어진다. 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치의 기본적인 동작원리와 제어 방법에 대해 설명하고, 실험 결과를 통하여 제안되어진 모듈화 균일 장치의 성능을 검증하였다.

2. 모듈화 전하 균일 장치

2.1 시스템 구성

제안되어진 전하 균일 장치는 그림 1(a)처럼 모듈 개념을 적용한 시스템이다. 각 모듈은 N 개의 배터리 셀과

스위치 그리고 하나의 다권선 변압기를 포함하고 있다. 다권선 변압기(T)는 이차 측에 한 개의 자화 인덕턴스(L_m), 일차 측에 N 개의 누설 인덕턴스(L_{lkN}), ($N_1:N_2=1:1$)의 권선 비를 갖는 이상 변압기로 구성된다. 배터리 특성을 나타내기 위해서, 배터리는 전압전원 e_b 과 내부 저항 R_b 을 갖는 모델로 등가화 시킨다.

모듈 개념이 적용되지 않은 기존 다권선 변압기를 이용한 균일 장치는 다권선 변압기의 포화를 방지하기 위하여, 다이오드로 구성된 변압기 2차측이 배터리 스트링의 맨 위쪽 배터리 셀과 맨 아래쪽 배터리 셀로 연결되어, 변압기를 리셋 시키게 된다. 하지만 그림 1(a)처럼 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치는 각 모듈의 다권선 변압기 포화를 방지하기 위하여, 다이오드로 구성된 변압기 2차측이 다른 모듈의 배터리 스트링에 연결되어 있다. 이러한 회로 구성 때문에 제안되어진 모듈화 균일 장치는 모듈 균일화를 위해서 다권선 변압기의 자화 에너지를 이용할 수 있다. 그림 1(b)는 제안된 모듈화 균일 장치가 M 개의 모듈로 확장된 개념을 보여주고 있다. 각 모듈의 변압기 2차측이 바로 아래 모듈의 배터리 스트링에 연결되었고, 마지막 (M 번째) 모듈의 변압기 2차측은 첫 번째 모듈의 배터리 스트링에 연결되었다. 모듈화를 위해 변압기나 컨버터를 추가적으로 모듈 사이에서 이용했던 기존 모듈화 균일 장치와 달리, 그림 1처럼 제안되어진 모듈화 균일 장치는 모듈과 모듈 사이에 추가적인 장치 없이 단순히 연결만 되어 있기 때문에, 모듈화에 관련된 크기, 부피, 손실의 증가 없이 길게 직렬로 연결되어진 배터리 스트링에 적용할 수 있다.

2.2 동작모드 분석



Fig. 2 Operating modes of the proposed modularized charge equalizer

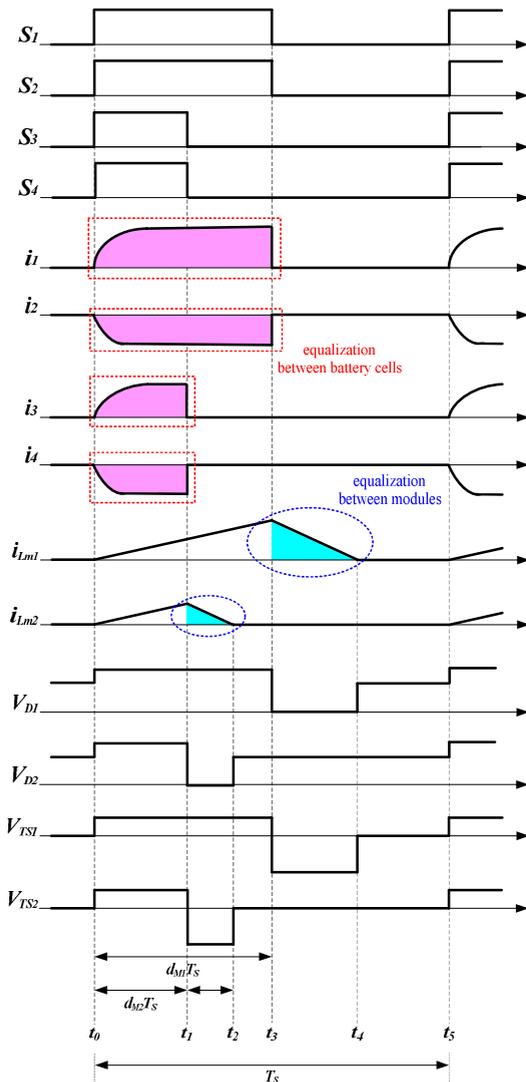


Fig. 3 Operating waveforms of the proposed modularized charge equalizer

동작모드 분석을 간략화 하기 위해, 다음과 같이 가정 하였다.

- 1) 각 모듈은 두 개의 배터리 셀에 연결되어 있다.
- 2) 바디 다이오드(D_{S1} , D_{S2} , D_{S3} , D_{S4})를 제외한 네 개의 스위치 (S_1 , S_2 , S_3 , S_4)와 두 개의 다이오드(D_b , D_2)는 이상적인 상태에 있다고 가정한다.
- 3) 배터리 모듈 1의 전압 $V_{M1}(=V_{B1}+V_{B2})$ 이 배터리 모듈 2의 전압 $V_{M2}(=V_{B3}+V_{B4})$ 보다 크기 때문에, 모듈 1에 대한 듀티 사이클 d_{M1} 이 모듈 2에 대한 듀티 사이클 d_{M2} 보다 크다.
- 4) 배터리 셀 전압 : $V_{B1} > V_{B2} > V_{B3} > V_{B4}$

정상 상태에서 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치는 스위칭 한주기 동안에 네 개의 모드를 갖는다. 동작모드와 이론적인 파형이 각각 그림 2와 3에서 보여준다.

(A) Mode 1 [t_0, t_1] : t_0 시점에서 네 개의 스위치 (S_1, S_2, S_3, S_4)가 동시에 켜지고, 변압기 이차 측에 있는 자화 인덕턴스 사이에 전압 V_{TSn} 이 걸린다. 따라서 자화 전류(i_{Lmn})는 다음과 같이 표현할 수 있다.

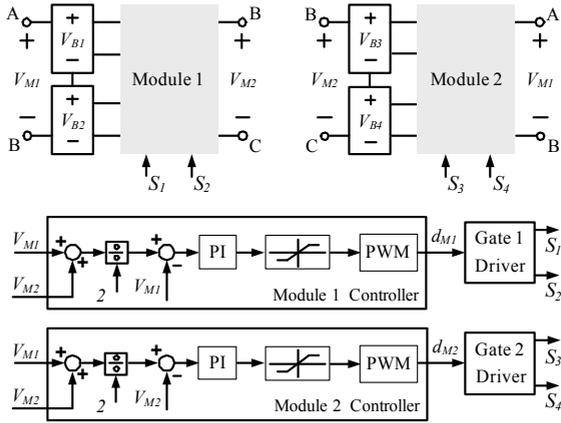
$$i_{Lmn}(t) = \frac{V_{TSn}}{L_{mn}}(t - t_0) \tag{1}$$

자화 전류와 배터리 셀 전류(i_n) 사이에 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

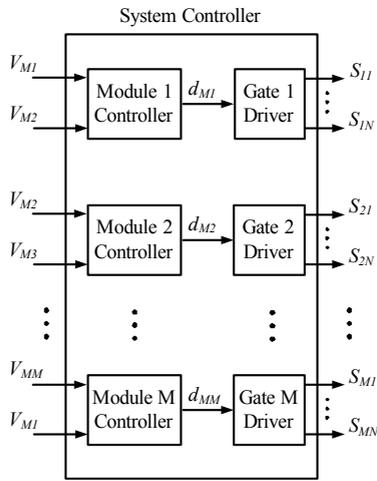
$$i_{Lm1} = i_1 + i_2 \tag{2}$$

$$i_{Lm2} = i_3 + i_4 \tag{3}$$

모드 1에서 각 모듈은 변압기 일차 측에 두 개의 루프를 갖는다. 두 개의 루프 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.



(a) Control method for two modules



(b) Control method for M modules

Fig. 4 Control structure of the proposed modularized charge equalizer

$$e_{Bn} - R_{Bn}i_n = V_{TPn} + L_{lkn} \frac{di_n}{dt} \quad (4)$$

여기서 각 모듈 변압기에 걸리는 전압 V_{TPn} 이 두 배터리 셀 전압의 평균값 이라고 가정하면, 두 배터리 셀 전류 중에 하나는 (+)값을 가져야 하고, 다른 하나는 (-) 값을 가져야 한다. 즉, 배터리 셀 전압이 두 배터리 셀 전압의 평균값보다 작으면 충전되고, 크면 방전되는 것을 의미하기 때문에, 식 (3)은 제안되어진 균일 장치가 배터리 셀 사이에 균일화를 이룰 수 있다는 것을 보여 준다.

다이오드 D_1, D_2 에 걸리는 전압 V_{D1}, V_{D2} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{D1} = V_{B3} + V_{B4} + V_{TS1} \quad (5)$$

$$V_{D2} = V_{B1} + V_{B2} + V_{TS2} \quad (6)$$

모듈 1에서 배터리 셀 1 전압 V_{B1} 이 배터리 셀 2 전

Table 1 Experiment parameter

Lithium-ion battery	3.8 Ah
Battery internal resistance	$R_{Bn} = 0.05$ ohm
Switching frequency	$f_s = 10$ kHz
Magnetizing inductance	$L_{mn} = 1$ mH
Leakage inductance	$L_{lkn} = 1$ μ H
Turns ratio	$N_1 : N_2 = 1 : 1$
Initial cell voltages	$V_{B1} > V_{B2} > V_{B3} > V_{B4} > V_{B5} > V_{B6}$
Initial module voltage	$V_{M1} (= V_{B1} + V_{B2} + V_{B3})$ $> V_{M2} (= V_{B4} + V_{B5} + V_{B6})$

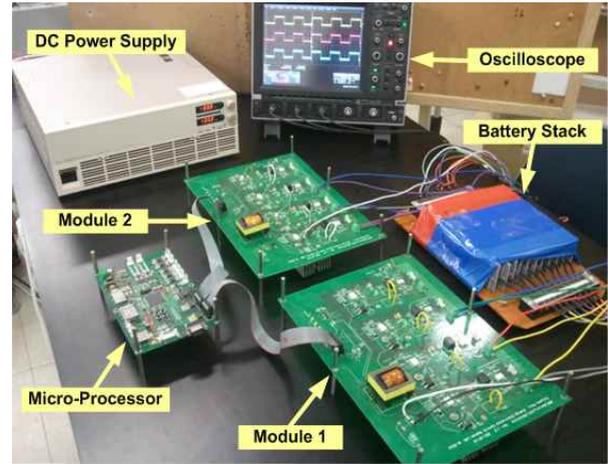


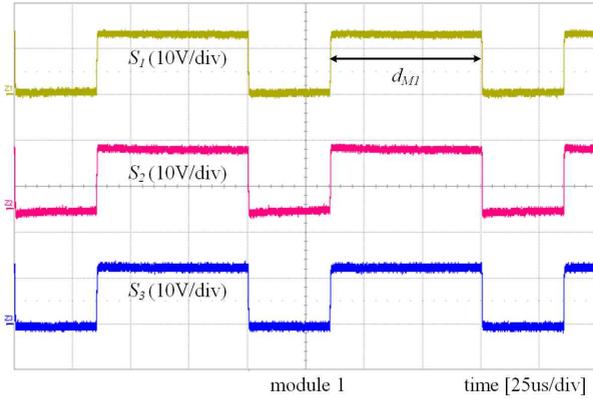
Fig. 5 Test set for the proposed modularized charge equalizer

압 V_{B2} 보다 크고, 모듈 2에서는 배터리 셀 3 전압 V_{B3} 이 배터리 셀 4 전압 V_{B4} 보다 크다. 따라서 전류 i_1 와 i_3 는 배터리 셀에서 변압기로 흐르고, 전류 i_2 와 i_4 는 변압기에서 배터리 셀로 전류가 흐른다. 이것은 배터리 셀 1에 있는 전하가 배터리 셀 2로 이동하고, 배터리 셀 3에 있는 전하가 배터리 셀 4로 이동한다는 의미이다. 모드 1에서 제안되어진 모듈화 균일 장치는 모듈 안에서 배터리 셀 사이에 균일화를 이룰 수 있다.

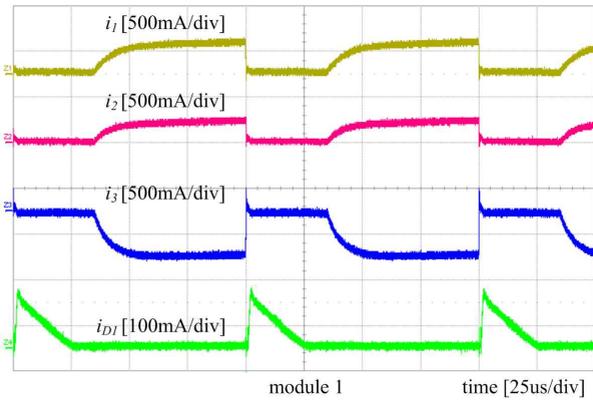
(B) Mode 2 [t_1, t_2] : t_1 시점에서 모듈 2에 있는 두 개의 스위치(S_3, S_4)가 동시에 꺼진다. 이때 자화 전류 i_{Lm2} 가 연속적으로 흘러야하기 때문에, 모듈 2에 있는 다이오드 D_2 가 도통된다. 자화 전류 i_{Lm2} 는 모듈 1의 배터리 스트링으로 흐르고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lm2}(t) = i_{Lm2}(t_1) - \frac{V_{M1}}{L_{m2}}(t - t_1) \quad (7)$$

모드 2에서는 배터리 모듈 2의 전하가 배터리 모듈 1으로 이동한다. 또한 모드 1과 마찬가지로 배터리 셀 1에 있는 전하가 배터리 셀 2로 이동한다. 따라서 모드 2에서 제안되어진 모듈화 균일 장치는 배터리 모듈 사이 뿐만 아니라 배터리 셀 사이에도 균등화가 동시에 이루어진다.

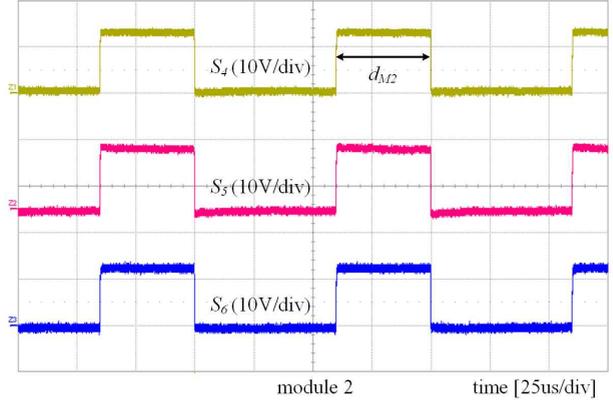


(a) The gate signals of three switches for module 1

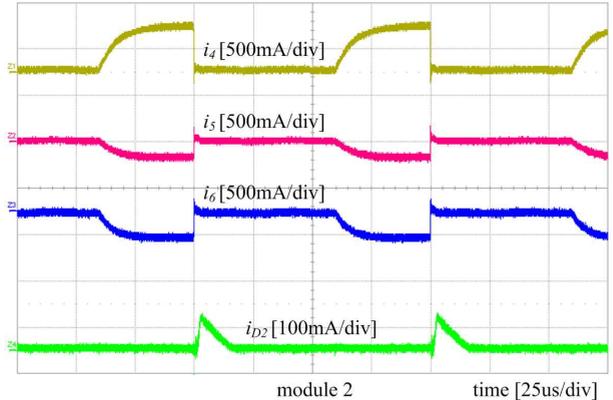


(b) Battery cell currents and diode current for module 1

Fig. 6 Experimental waveforms for the module 1



(a) The gate signals of three switches for module 2



(b) Battery cell currents and diode current for module 2

Fig. 7 Experimental waveforms for the module 2

(C) Mode 3 [t_2, t_3] : t_2 시점에서 자화 전류 i_{Lm2} 가 영으로 되기 때문에 자화 인덕턴스에 걸리는 전압 V_{Lm2} 는 영으로 된다. 그 때 다이오드 D_2 에 걸리는 전압 V_{D2} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{D2} = V_{B1} + V_{B2} \quad (8)$$

모듈 1에서 배터리 셀 1의 전하는 배터리 셀 2로 이동된다. 따라서 모드 3에서 제안되어진 모듈화 균일 장치는 모듈 안에서 배터리 셀 사이에 균등화를 이룰 수 있다.

(D) Mode 4 [t_3, t_4] : t_3 시점에서 모듈 1에 있는 두 개의 스위치(S_1, S_2)가 동시에 꺼진다. 이때 자화 전류 i_{Lm1} 가 연속적으로 흘러야하기 때문에, 모듈 1에 있는 다이오드 D_1 가 도통된다. 자화 전류 i_{Lm1} 는 모듈 2의 배터리 스트링으로 흐르고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lm1}(t) = i_{Lm1}(t_3) - \frac{V_{Lm2}}{L_{m1}}(t - t_3) \quad (9)$$

모드 4에서는 배터리 모듈 1의 전하가 배터리 모듈 2로 이동한다. 따라서 모드 4에서 제안되어진 모듈화 균일 장치는 배터리 모듈 사이에 균등화가 이루어진다. 모

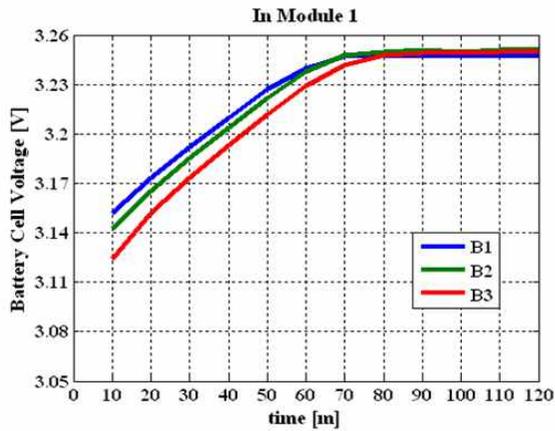
듈 1에 적용되는 듀티 사이클 D_{M1} 은 모듈 2에 적용되는 듀티 사이클 D_{M2} 보다 크기 때문에, 모듈 1의 변압기 리셋 기간(t_3-t_4)이 모듈 2의 변압기 리셋 기간 (t_1-t_2)보다 길다. 모듈 1보다 적은 에너지를 가지고 있는 모듈 2는 변압기 리셋 기간에 모듈 1로부터 더 많은 배터리 에너지를 받기 때문에, 모듈 사이에 균등화를 이룰 수 있다. t_4 시점에서 자화 전류 i_{Lm1} 는 영이 되기 때문에 자화 인덕턴스에 걸리는 전압 V_{Lm1} 은 영이다. 그 때 다이오드 D_1 에 걸리는 전압 V_{D1} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{D1} = V_{B3} + V_{B4} \quad (10)$$

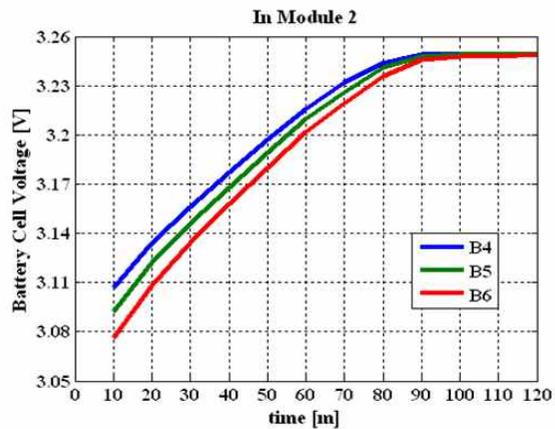
기간(t_4-t_5)동안 제안되어진 모듈화 균일 장치는 전류가 흐르지 않는다. 이것은 균일 장치가 불연속 도통 모드(DCM)에서 동작한다는 의미이다. t_5 시점에서는 다음 스위칭 주기의 모드 1로 돌아간다.

2.3 제어 방법

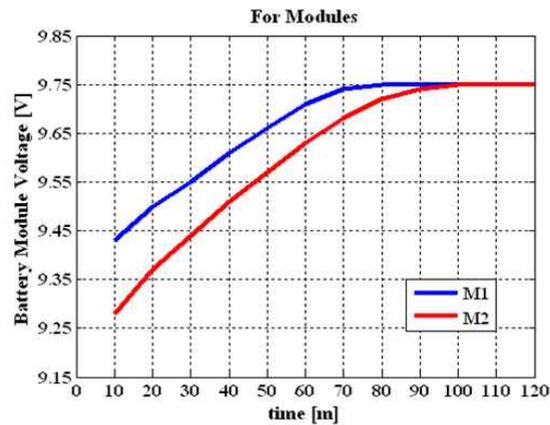
그림 4(a)는 네 개의 배터리 셀과 두 개의 모듈로 구성된 시스템을 위한 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치의 제어 구성을 간략히 보여준다. 모든 배터리 셀 전압



(a) Battery cell voltages in module 1



(b) Battery cell voltages in module 2



(c) Battery module voltages

Fig. 8 Experimental results of charging with the proposed modularized charge equalizer

을 측정하는 기존 균일 장치와 달리 제안된 균일 장치는 균일화를 위해 배터리 모듈 전압(V_{M1} , V_{M2})만을 측정한다. 배터리 셀과 모듈 모두의 균일화를 위해, 제안된 모듈화 전하 균일 장치는 모듈 안에 있는 모든 스위치를 동시에 켜고 끈다. 모듈 안에 있는 모든 스위치가 켜져 있는 동안, 배터리 에너지는 자동적으로 높은 전압의 배터리 셀에서 낮은 전압의 배터리 셀로 이

동 된다. 모듈 안에 있는 모든 스위치가 동시에 꺼졌을 때, 다권선 변압기의 자화 전류가 변압기 리셋이 끝나는 시점까지 다른 모듈의 배터리 스트링으로 흐르게 된다. 높은 듀티 사이클은 낮은 듀티 사이클보다 더 많은 자화 에너지를 발생시키기 때문에, 모듈 사이에 균일화는 듀티 사이클 제어에 의해서 달성 될 수 있다. 높은 전압을 가지고 있는 배터리 스트링에 높은 듀티 사이클을 적용시키기 위해서, 음의 비례 이득이 PI 제어기에서 사용된다. 음의 피드백 루프와 음의 비례 이득 때문에 모듈 전압이 평균 모듈 전압보다 낮으면 듀티 사이클이 영이 된다. 이것은 낮은 전압의 배터리 스트링을 가지고 있는 모듈이 동작을 하지 않는다는 것을 의미한다. 낮은 전압의 배터리 스트링을 갖는 모듈에 최소한의 듀티 사이클을 적용하기 위해서 하한(lower limit)을 사용하였다. 반면에 제안된 모듈화 전하 균일 장치를 불연속 도통 모드에서 동작시키기 위해서 상한(upper limit)을 사용하였다. 듀티 사이클 d_{M1} 은 모듈 1의 스위치(S_1 , S_2)에 적용시키고, 듀티 사이클 d_{M2} 은 모듈 2의 스위치(S_3 , S_4)에 적용시킨다.

그림 4(b)는 M 개의 모듈로 구성된 시스템에 적용할 수 있는 제안된 모듈화 전하 균일 장치의 제어 구성을 보여준다. M 개의 모듈로 구성된 시스템 역시 그림 4(a)와 동일한 방식으로 제어 된다. 따라서 모듈의 개수가 증가하더라도 모듈 제어기(Module Controller)와 게이트 드라이버(Gate Driver)의 개수만 증가하고 다른 추가적인 제어방법이 요구 되지 않는다. 하지만 기존 모듈화 균일 장치처럼 제안된 모듈화 전하 균일 장치에 매우 많은 수의 배터리 모듈이 적용 될 때에는, 배터리 모듈 사이에 에너지 이동이 맨 위에 배터리 모듈부터 맨 아래쪽의 배터리 모듈까지 에너지가 단계적으로 이동하기 때문에, 모듈 사이에 긴 균형화 시간을 갖게 될 수 있다. 이러한 경우 제안된 모듈화 균일 장치를 모듈 사이에 추가적으로 적용하게 되면, 긴 균형화 시간을 극복할 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 모듈화 전하 균일 장치의 성능을 확인하기 위해서 그림 5와 같은 실험 세트가 완성되었고, 실험에 사용된 조건은 표 1과 같다. 실험 세트는 두 개의 모듈로 이루어진 전하 균일 장치, DSP (TMS320F28335) 보드, 6개의 배터리 셀이 직렬로 연결된 배터리 팩, DC 전원공급기로 구성되어진다. 각 모듈은 세 개의 MOSFET, 한 개의 다이오드와 다권선 변압기를 포함하고 있다. PWM 제어기는 제안된 모듈화 전하 균일 장치가 불연속 도통 모드에서 동작될 수 있도록 듀티 사이클 크기를 제한한다.

그림 6과 7은 각각 모듈 1(배터리 B_1 , B_2 , B_3)과 모듈 2(배터리 B_4 , B_5 , B_6)의 실험 파형을 보여준다. 그림

6(a)와 7(a)처럼 각 모듈 안에 있는 모든 스위치는 동시에 켜고 끈다. 배터리 모듈 1 전압 V_{M1} 이 배터리 모듈 2 전압 V_{M2} 보다 크기 때문에, 듀티 사이클 d_{M1} 은 듀티 사이클 d_{M2} 보다 크다. 따라서 모듈 1의 다권선 변압기가 모듈 2의 다권선 변압기보다 리셋 시키는 에너지가 크기 때문에, 그림 6(b)와 그림 7(b)에서 보여주는 것처럼 다이오드 D_1 을 흐르는 전류 i_{D1} 가 다이오드 D_2 를 흐르는 전류 i_{D2} 보다 크다. 이것은 모듈 균일화를 위해 모듈 1의 배터리 에너지가 모듈 2의 배터리로 이동된다는 것을 의미한다. 그림 6(b)와 그림 7(b)처럼 스위치가 켜져 있는 동안 배터리 셀 전류 (i_1, i_2, i_4)는 배터리 셀에서 다권선 변압기로 흐르고, 배터리 셀 전류 (i_3, i_5, i_6)는 다권선 변압기에서 배터리 셀로 흐른다. 이것은 모듈 1에서 배터리 셀 1과 2의 에너지가 배터리 셀 3으로 이동하고, 모듈 2에서는 배터리 셀 4의 에너지가 배터리 셀 5와 6으로 이동한다는 것을 의미한다.

그림 8은 충전 중 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치의 실험 결과를 보여준다. 그림 8(a)와 8(b)처럼 모든 배터리 셀은 약 3.25V까지 충전된다. 각 모듈은 세 개의 배터리 셀로 구성되어 있기 때문에, 그림 8(c)처럼 배터리 모듈은 약 9.75V까지 충전된다. 셀 전압 차이와 모듈 전압 차이 모두 시간이 지남에 따라 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실험 결과는 배터리가 충전되고 있는 동안 배터리 셀과 모듈의 균일화가 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치에 의해서 잘 이루어지고 있다는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 모듈 균일화를 위해 다권선 변압기의 자화 에너지를 이용한 새로운 제어 방법이 제안되었다. 배터리 모듈 전압 상태에 따라서 다른 듀티 사이클이 각각의 모듈에 적용된다. 제안되어진 제어 방법을 사용하면 모듈 사이에 추가적인 장치 없이도 모듈 균일화가 이루어진다. 따라서 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치는 매우 길게 직렬로 연결되어진 배터리 스트링에도 모듈화와 관련된 비용, 크기, 손실의 발생 없이 적용할 수 있다. 실험 결과를 통해서 제안되어진 모듈화 전하 균일 장치의 유용성을 검증하였다. 제안되어진 제어 방법은 다권선 변압기를 이용하는 다른 균일 장치의 모듈화에도 쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] C. Karnjanapiboon, Y. Rungruengphalanggul, and I. Boonyaroonate, "The low stress voltage balance charging circuit for series connected batteries based on buck-boost topology," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, Bangkok, Thailand, pp. III-284 - III-287, May 2003.

[4] Y.-S. Lee and G.-T. Cheng, "Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 21, No. 5, pp. 1213 - 1224, Sep. 2006.

[5] Y.-S. Lee and M.-W. Cheng, "Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 52, No. 5, pp. 1297 - 1307, Oct. 2005.

[6] G. L. Brainard, "Non-dissipative battery charger equalizer," U.S. Patent 5 479 083, Dec. 26, 1995.

[7] B. T. Kuhn, G. E. Pitel, and P. T. Krein, "Electrical properties and equalization of lithium-ion cells in automotive applications," in *Proc. IEEE Vehicle Power Propuls. Conf.*, Chicago, IL, pp. 55 - 59, Sep. 2005.

[8] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in *Proc. 12th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Atlanta, GA, pp. 848 - 854, Feb. 1997.

[9] S. West and P. T. Krein, "Equalization of valve-regulated lead-acid batteries: Issues and life test results," in *Proc. 22nd Annu. Int. Telecommun. Energy Conf.*, Phoenix, AZ, pp. 439 - 446, Sep. 2000.

[10] A. C. 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.

[11] 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.

[12] H. Sakamoto, K. Murata, E. Sakai, and K. Nishijima, "Balanced charging of series connected battery cells," in *Proc. 22th Annu. Int. Telecommun. Energy Conf.*, San Francisco, CA, pp. 311 - 315, Oct. 1998.

[13] T. Gottwald, Z. Ye, and T. Stuart, "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 33, No. 1, pp. 307 - 312, Jan. 1997.

[14] M. Tang and T. Stuart, "Selective buck-boost equalizer for series battery packs," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 36, No. 1, pp. 201 - 211, Jan. 2000.

[15] N. H. Kutkut, "Non-dissipative current diverter using a centralized multi-winding transformer," in *Proc. 28th IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, St. Louis, MO, pp. 648 - 654, Jun. 1997.

[16] T. C. Chen and Z. J. Guey, "Charge equalizer or series of connected battery strings," U.S. Patent 6 008 623, Dec. 28, 1999.

[17] H. S. Park, C. H. Kim, K. B. Park, G. W. Moon, and J. H. Lee, "Design of a charge equalizer based on battery modularization," *IEEE Trans. Veh. Tech. nol.*, Vol. 58, No. 7, pp. 3216 - 3223, Sep. 2009.

[18] H.-S. Park, C.-E. Kim, C.-H. Kim, G.-W. Moon, and J.-H. Lee, "A modularized charge equalizer for an HEV

lithium-ion battery string," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 5, pp. 1464 - 1476, May 2009.

- [19] C. H. Kim, M. Y. Kim, J. H. Kim, and G. W. Moon, "Modularized charge equalizer with intelligent switch block for lithium-ion batteries in an HEV," in *Proc. 31st Annu. Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp. 1 - 6, Oct. 2009.



임창순(任昶淳)

1984년 9월 11일생. 2009년 숭실대 정보통신전자공학부 졸업. 2011년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원형공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전기제어생체공학부 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.



김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1997년 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.