

벅부스트 방식의 새로운 배터리 이퀄라이저의 설계 및 해석

박상현 김태성 박진식 문건우 윤명중
한국과학기술원

Design and analysis of a new buck-boost type battery equalizer

Sang-Hyun Park, Tae-Sung Kim, Jin-Sik Park, Gun-Woo Moon and Myung-Joong Youn
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 하나의 인덕터만을 사용하여 동작하는 벅부스트 방식의 새로운 배터리 이퀄라이저를 제안하고, 그 동작을 살펴본다. 제안된 배터리 이퀄라이저는 배터리 전압을 센싱할 필요 없이, 벅부스트의 DCM(전류 불연속) 모드를 이용하여 배터리 간의 에너지를 순차적으로 순환시키고 이 과정을 반복하여 배터리 간의 전압을 균등화한다. 즉, 제안된 회로는 전압 센싱을 필요로 하지 않으므로 제어 회로를 단순화 시킬 수 있고, 인덕터를 하나만 사용함으로써 회로 자체의 크기와 가격을 줄일 수 있는 장점을 가진다.

1. Introduction

전기 자동차(EVs)와 무정전 전원 공급 장치(UPS), 광발전 시스템(PV) 등 여러 가지 분야에서 고전압을 얻기 위해 직렬로 연결한 배터리 스택(stack)을 사용한다. 이러한 배터리 스택을 사용하는 경우, 충전 또는 방전과정에서 모든 배터리 셀들에 동일한 전류가 흐르게 된다. 제조 공정 간의 편차나 그 외의 환경적 요인들로 인해 각 배터리 간에는 특성차이가 존재하고, 이는 충전 과정에서 다른 셀들이 미처 완충되기 전에 과충전되는 배터리가 생기거나, 방전과정에서 먼저 저전압으로 떨어지는 배터리가 생기게 할 수 있다. 이런 문제는 배터리 셀의 과열이나 개싱(gassing)등의 원인이 되고 배터리의 수명과 신뢰성을 떨어뜨린다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 배터리 셀들의 전압을 균등하게 유지시켜주는 배터리 이퀄라이저(Battery Equalizer)가 필요하게 된다.

배터리 전압을 균등하게 만들어 주는 방법 중에서 가장 간단한 방법은 각 배터리 셀에 병렬로 바이패스 저항을 달아주어 분로회로(shunt circuitry)를 형성해 주는 것이다.^[1] 그러나 이 방법은 바이패스 저항에 의해 상당한 에너지 손실이 발생할 뿐만 아니라, 바이패스 저항에 흐르는 전류를 조절하지 못하므로 완벽한 전압 균등화가 이루어지지 못한다는 단점이 있다. 전압 균등화를 완벽하게 해주기 위한 방법으로 ICE(Individual cell equalizer)를 각 셀에 병렬로 연결하는 전압 제어 전류 분리기(Voltage controlled current shunt)방법^[2]이 있지만, 여전히 바이패스 저항에 의한 손실은 존재하게 된다.

이러한 손실을 막기 위해 여러 가지 배터리 이퀄라이저가 제안되었다. 그중, 절연 dc-dc 컨버터를 이용한 방법^[6]은 임의

의 배터리 전압이 정해진 전압을 초과하면, 그 배터리에 상응하는 dc-dc 컨버터를 동작시켜 초과 에너지를 다른 배터리 셀들로 넘겨줌으로써 배터리 전압을 정확하게 조절한다. 무손실 전류 전환기(non-dissipative current diverter)를 이용한 방법^[3]은 각 셀에 병렬로 연결된 전류 변환기 중 완충 상태의 배터리 셀에 상응하는 전류 변환기만 동작시켜 완충된 배터리 셀로 더 이상 전류가 흐르지 않게 하여 과충전을 막는 방법이다. 위의 두 방법은 전압 센싱이 필요할 뿐만 아니라 각 셀마다 변압기와 인덕터가 사용되므로 전체 시스템의 크기와 단가가 크게 증가된다는 단점을 지닌다.

다중 권선 변압기를 갖는 컨버터를 이용한 전류 변환기^[4]는 전압 센싱을 필요로 하지 않아 제어 회로 구성 요소가 적고 제어가 간단하다는 장점을 지니지만, 각 권선들의 누설 인덕턴스 차이를 보상해주기 위한 추가적인 인덕터 삽입이 필요하다는 단점을 지닌다.

본 논문에서는 이런 문제를 해결하기 위해, 배터리 전압의 센싱없이 하나의 인덕터만을 사용해 전압 균등화할 수 있는 새로운 벅부스트 방식의 배터리 이퀄라이저(그림 1)를 제안한다.

2. 제안된 배터리 이퀄라이저와 그 동작

2.1 회로 설명

제안된 배터리 이퀄라이저와 그 주요파형은 각각 그림 1과 2와 같다. N개의 배터리가 직렬로 연결되어 있고, 각 배터리 사이에는 2개의 단방향 스위치가 서로 반대 방향의 전류패스를 갖도록 연결되어 있다. 전류 패스 중 하나는 node A에 다른 하나는 node B에 연결한다. 단, node a, b와 node A, B 간의 패스에는 단방향 스위치 대신 하나의 스위치 또는 하나의 다이오드만을 그림 1과 같은 방향으로 연결한다.

그림 2와 같이, 임의의 배터리에서 인덕터로 전달된 에너지는 인덕터의 전류 불연속 모드(DCM)로 동작을 통해 모두 바로 하위 배터리로 전달된다. 단, 가장 하위 배터리에서 인덕터로 전달된 에너지는 맨 상위 배터리로 전달된다. 모든 배터리의 방전시간은 DT_s 로 일정하게 하여 배터리 방전에너지가 배터리 전압에만 비례하도록 함으로써, 배터리 전압의 균등화를 이룰 수 있다.

제안된 회로는 (이러한 방식은) 각 배터리 전압을 센싱할 필요가 없으므로 제어 회로의 구성요소가 상대적으로 적고, 제어가 간단하다는 장점이 있으며, 하나의 인덕터로 벅부스트 동작을 시켜주므로 회로의 크기와 가격을 줄여줄 수 있다.

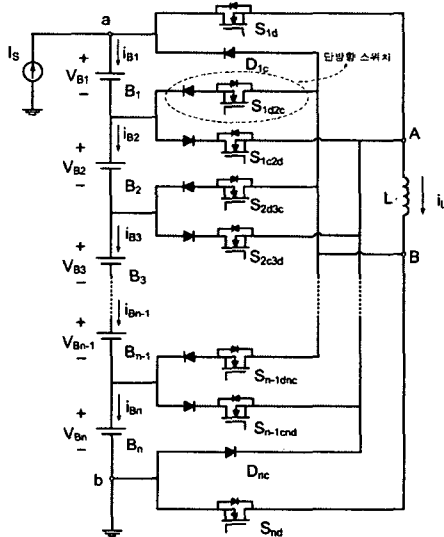


그림 1 제안된 회로

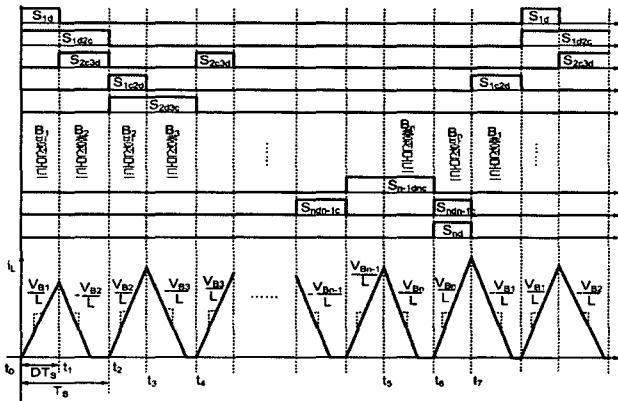


그림 2 스위칭 시퀀스와 인덕터 전류

2.2 동작 설명

배터리 이퀄라이저의 한주기동안의 동작은 그림 3과 같다.

· **B₁ 방전모드 (t₀ ~ t₁)** : 우선 3(a)과 같이 DT_s동안 S_{1d}와 S_{1dc}가 켜져 배터리 B₁을 방전시킨다. 이 에너지는 인덕터에 저장된다. 인덕터와 배터리 B₁에 흐르는 전류는 식(1)과 같다.

$$i_L(t) = -i_{B1}(t) = \frac{V_{B1}}{L} t \quad (1)$$

· **B₂ 충전모드 (t₁ ~ t₂)** : S_{1dc}를 켜 상태로 유지한 채로 S_{1d}를 끄고 S_{2cd}를 켜주면, 그림 3(b)의 B₂ 충전 모드가 시작된다. 인덕터에 저장된 에너지는 B₂를 충전시킨다. 이때 인덕터와 배터리 B₂에 흐르는 전류는 식(2)와 같다.

$$i_L(t) = i_{B2}(t) = \frac{V_{B2}}{L} DT_s - \frac{V_{B1}}{L} t \quad (2)$$

인덕터에 저장된 에너지가 모두 B₂로 전달되어 인덕터 전류는 0까지 떨어지며 그 이후 영전류를 유지한다.

· **B₂ 방전모드 (t₂ ~ t₃)** : S_{1dc}와 S_{2cd}를 꺼주고, S_{1cd}와 S_{2dc}를 켜주면 그림 3(c)의 B₂ 방전 모드가 시작된다. DT_s동안 B₂ 방전 모드가 유지되면서 B₂의 에너지가 방전되면서 인덕터의 전류가 증가한다. 인덕터와 배터리 B₂에 흐르는 전류는 식(3)과 같다.

$$i_L(t) = -i_{B2}(t) = \frac{V_{B2}}{L} t \quad (3)$$

· **B₃ 충전모드 (t₃ ~ t₄)** : 비슷한 방법으로 B₃ 충전 모드를 시작하게 되면, 인덕터의 에너지가 B₃를 충전시킨다. 인덕터와 배터리 B₃에 흐르는 전류는 식(4)와 같다.

$$i_L(t) = i_{B3}(t) = \frac{V_{B3}}{L} DT_s - \frac{V_{B2}}{L} t \quad (4)$$

인덕터에 저장된 에너지가 모두 B₃로 전달되어 인덕터 전류는 0까지 떨어지며 그 이후 영전류를 유지한다.

같은 방법으로 B_n 방전 모드에서 인덕터와 배터리 B_n에 흐르는 전류는 식(5)로, B₁ 충전 모드에서 인덕터와 배터리 B₁에 흐르는 전류는 식(6)으로 정해진다.

$$i_L(t) = -i_{Bn}(t) = \frac{V_{Bn}}{L} t \quad (5)$$

$$i_L(t) = i_{B1}(t) = \frac{V_{B1}}{L} DT_s - \frac{V_{Bn}}{L} t \quad (6)$$

배터리 B₁의 충전 모드가 끝나면, 모든 모드의 한 주기가 완료되고, 다시 B₁ 방전 모드부터 반복하게 된다.

3. 제안된 배터리 이퀄라이저의 전압 균등화원리

인덕터 L은 전류 불연속 모드(DCM)로 동작시키므로, B₁ 방전모드 동안 배터리 B₁에서 방전되는 에너지 E_{B1, discharge}와 B₂의 충전모드에서 배터리 B₂로 충전되는 에너지 E_{B2, charge}는 식(1)~(2)로부터 식(7)와 같이 구해진다.

$$E_{B1, discharge} = E_{B2, charge} = \frac{1}{2} L \times \left(\frac{V_{B1}}{L} DT_s \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{(V_{B1} DT_s)^2}{L} \quad (7)$$

동일하게 식(3)과 (4)로부터, B₂ 방전모드 동안 배터리 B₂에서 방전되는 에너지 E_{B2, discharge}와 B₃의 충전모드에서 배터리 B₃로 충전되는 에너지 E_{B3, charge}는 식(8)과 같다.

$$E_{B2, discharge} = E_{B3, charge} = \frac{1}{2} \frac{(V_{B2} DT_s)^2}{L} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터, 한주기 동안 배터리 B₂ 셀의 충전 에너지와 방전 에너지의 차이는 식(9)와 같다.

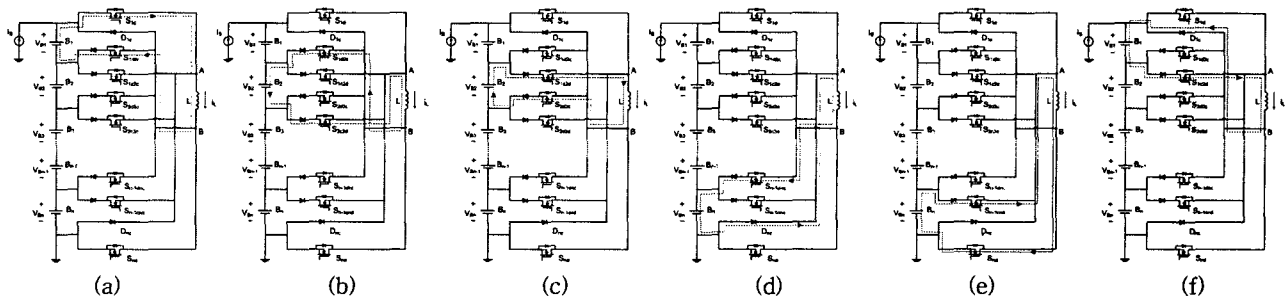


그림 3 모드별 등가회로 : (a) B₁ 방전 모드 (b) B₂ 충전 모드 (c) B₂ 방전 모드 (d) B_n 충전 모드 (e) B_n 방전 모드 (f) B₁ 충전 모드

$$\begin{aligned} \Delta E_{B2} &= E_{B2, \text{charge}} - E_{B2, \text{discharge}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{(DT)^2}{L} (V_{B1}^2 - V_{B2}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 만약 $V_{B1} > V_{B2}$ 라면 인덕터 L에 의한 B2의 충전에너지가 방전에너지보다 크기 때문에 B2의 전압은 증가하게 되고, $V_{B1} < V_{B2}$ 면 인덕터 L에 의한 B2의 충전에너지가 방전에너지보다 작기 때문에 B2의 전압은 감소하게 된다.

같은 방법으로 배터리 B_n 한 셀에 충전되는 에너지와 방전되는 에너지의 차이는 식(10)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta E_{Bn} &= E_{Bn, \text{charge}} - E_{Bn, \text{discharge}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{(DT)^2}{L} (V_{Bn-1}^2 - V_{Bn}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 $V_{Bn-1} > V_{Bn}$ 이면 B_n 의 전압은 증가하게 되고, $V_{Bn-1} < V_{Bn}$ 이면 B_n 의 전압은 감소함을 알 수 있다. (단, 첫 번째 배터리 B_1 은 마지막 배터리 B_n 과의 전압을 비교한다.)

위의 식 (10), (11)으로 알 수 있듯이 배터리 B_n 의 양단 전압이 상위 배터리 B_{n-1} 의 양단 전압보다 높으면 B_n 의 양단 전압은 높아지고, 반대의 경우라면 B_n 의 양단 전압은 낮아지게 된다. (단, B_1 의 상위 배터리는 B_n) 따라서, 각 배터리 간에 순차적으로 에너지를 순환시키면, 상대적으로 양단 전압이 낮은 배터리는 전압이 증가하고, 상대적으로 배터리 전압이 높은 배터리는 전압이 감소하게 되어 많은 주기를 거치게 되면, 배터리 셀 간의 전압 차가 줄어들어 배터리 전압은 같아지게 된다.

4. 실험결과

제안한 배터리 이퀄라이저의 동작을 증명하기 위해서 12V, 1.9AH의 배터리 3개를 직렬로 연결하여 프로토타입 회로를 구성하여 실험을 수행하였다. 전류원 $I_s=0.2A$, 인덕터 $L=79.64\mu H$, $T_s=18.75\mu s$, $D=0.3$ 의 사양으로 실험하였고, 각 배터리의 초기 전압은 $V_{B1} = 12.24V$, $V_{B2} = 12.09V$, $V_{B3} = 11.65V$ 이다. 그림 4는 균등화를 시작한 초기시점의 배터리 전류와 인덕터의 전류를 보인다. 그림 3으로부터 전압이 가장 높은 배터리 B_1 의 방전전류 피크치가 가장 높고, 전압이 가장 낮은 배터리 B_2 의 방전전류 피크치가 가장 낮은 것을 확인 할 수 있다.

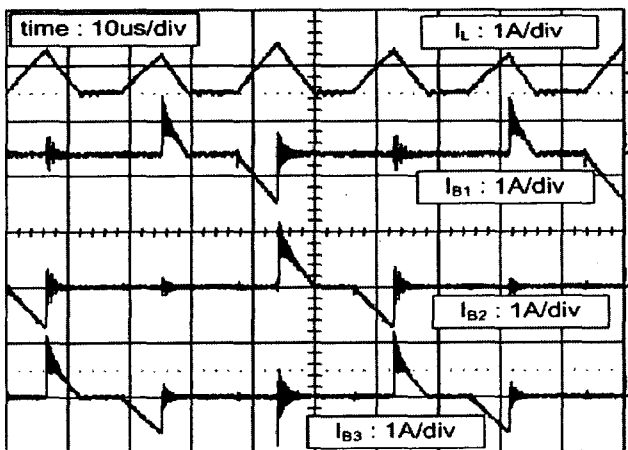


그림 4 인덕터 전류와 각 배터리 전류

그림 5는 전류원에 의한 충전과 균등화를 반복적으로 수행한 배터리 양단 전압의 변화를 나타낸다. 시간이 지남에 따라 각 배터리 셀 전압이 균등해지는 것을 확인할 수 있다.

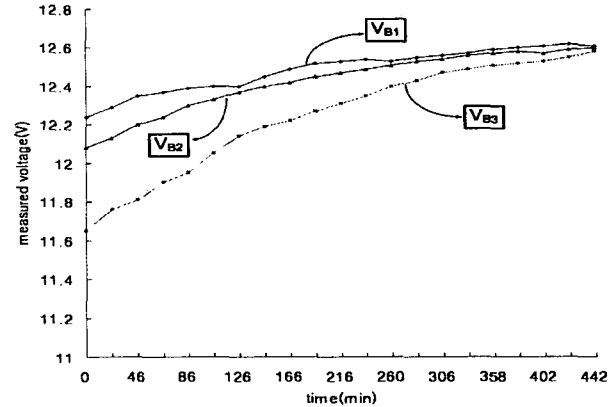


그림 5 배터리 전압 균등화 실험 결과

5. 결론

본 논문에서는 벡부스트 방식의 새로운 배터리 이퀄라이저가 제안되었다. 제안된 회로는 배터리 전압을 센싱할 필요 없이, 하나의 인덕터를 벡부스트 DCM 모드로 동작시켜 전압을 균등화 시킨다. 따라서 제어 회로의 구성요소가 상대적으로 적고, 제어가 간단하며, 회로의 크기와 가격을 줄일 수 있다는 장점을 지닌다.

이 논문은 인공위성연구센터(SATREC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] D. Bjork, "Maintenance of Batteries - new trends in batteries and automatic battery charging," INTELEC Conf. Proceedings, pp. 355-360, 1986.
- [2] B. Lindemark, "Individual Cell Voltage Equalizers(ICE) for Reliable Battery Performance," INTELEC Conf. Rec., pp. 196-201, Kyoto, Japan, 1991.
- [3] N. H. Kulkul, "Non-Dissipative Current Diverter Using A Centralized Multi-Winding Transformer," Power Electronics Specialists Conference, PESC '97, 28th Annual IEEE, Vol. I, 1997, pp. 648-226.
- [4] N.H. Kutht, "A Modular Nondissipative Current Diverter for EV Battery Charge Equalimtion," Applied Power Eleclrmiw Conference and Exposition. APEC '98, Thirteenth Annual, V01.2, 1998, pp. 686 -690.
- [5] M. Tang, T. Stuart, "Selective buck-boost equalizer for series battery packs," IEEE Trotis. Aero. Electronic Swerrrs, vol. 36, no. I, pp. 201-211, January 2000.
- [6] Lee, Y.S., and Cheng, G.T.: 'ZCS bi-directional dc-to-dc converter application in battery equalization for electric vehicle'. Proc. IEEE PESC, 35th Annual Meeting, Aachen, Germany, 2004, pp. 2766 - 2772.