

배터리 전하 균일 동작을 위한 체인구조를 가지는 스위치드 커패시터 회로

김문영, 문진우

대전 유성구 구성동 대학로 291, KAIST

ABSTRACT

최근 노트북 및 UPS, 그리고 전기자동차에 이르기까지 배터리를 사용하는 분야에서 에너지 밀도가 높은 리튬이온 배터리가 주로 사용된다. 이러한 리튬 이온 배터리의 안전성을 보장하고 배터리 수명을 늘리기 위해서는 각 셀 간의 전하 균일이 필요하며 여러 전하 균일 회로가 연구되었다. 이중 자기소자가 없이 능동 전하 균일을 이룰 수 있는 스위치드 커패시터 방식은 가장 간단하고 작은 부피로 제작이 가능하며, 셀 전압 센싱 없이 자동적으로 전하 균일을 이룰 수 있는 장점이 있으나, 전하 균일 속도가 셀 수가 증가 할수록 현저하게 느려지는 단점을 보인다. 제안하는 셀 전하 균일회로는 체인구조의 스위치드 커패시터 회로를 통하여 셀 간의 전하 균일 속도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안된 회로의 동작원리를 설명하고 실험을 통해 제안된 회로의 뛰어난 전하 균일 성능을 검증한다.

1. 서론

최근 노트북 및 UPS, 그리고 전기자동차에 이르기까지 많은 응용 분야에서 충전이 가능한 2차 전지를 사용하고 있다. 특히 에너지 밀도가 높은 리튬이온 배터리가 주로 사용되는데 이러한 리튬이온 배터리는 각 셀 당 전압이 낮기 때문에 전압과 전력 요구를 만족시키기 위해서 직렬로 쌓아서 사용하게 된다. 직렬로 쌓은 배터리를 편의상 직렬로 한꺼번에 충·방전을 하게 되는데, 이렇게 충·방전이 반복적으로 일어나게 되면 각 배터리간의 특성차이로 인하여 전하 불균형이 발생되게 된다. 전하 불균형은 배터리의 충·방전 효율을 저감시키고 이는 배터리 수명을 단축시키게 된다. 따라서 이러한 현상을 막기 위하여 전하 균일 회로가 필요하다 [1] [3]. 전하 균일 회로 중 가장 간단한 방법은 과 충전된 배터리를 저항으로 소모 시키는 수동 전하 균일 방식이다. 이는 간단하고 구현이 쉽다는 장점이 있으나 에너지 소모적이며 셀 전압을 하향 평준화 시킨다는 단점이 있다 [1]. 이를 극복하기 위해서 다양한 능동 소자를 사용하는 능동 전하 균일 회로들이 연구되어 왔다. 이러한 능동 전하 균일 회로들은 인덕터, 커패시터, 스위치등을 통해서 과충전된 배터리의 에너지를 저충전된 배터리로 전달하여 전하 균일을 이룬다 [1] [3]. 하지만 이러한 방식의 전하 균일 회로는 정확한 셀 전압 센싱을 요구하여 가격상승의 원인이 된다. 따라서 셀 전압 센싱없이 전하 균일을 이룰 수 있는 자동 전하 균일 회로들도 연구되었다. 이러한 자동전하 균일 회로들 중에 스위치드 커패시터 방식은 부피가 큰 자기소자가 필요 없으며 피드백 제어가 필요 없어 제어가 간단하고 배터리 충·방전 상태와 무관하게 전하 균일을 이룰 수 있는 장점을 가진다 [1] [3]. 하지만 스위치드 커패시터는 전압의 차이에 의해서만 에너지가 전달되므로 리튬이온 배터리와 같이 전하 저장량에 따라 전압차이가 작은 배터리에서는 전하 균일 속도가 느리게 된다. 특히, 각 인접셀간의 에너지 전달을 통해서만 전하 균일을 이루게 되므로 배터리 셀 수가 많아지게 되면 더욱 더 느린 전하 균일 속도를 가지게 된다.

스위치드 커패시터의 전하 균일 성능을 향상시키기 위해서, 본 논문에서는 체인구조를 가지는 리튬이온 배터리용 스위치드 커패시터 회로를 제안한다. 제안하는 회로는 최상위 셀과 하위셀 간의 직접적인 에너지 전달을 통하여 기존의 회로보다 현저하게 빠른 전하 균일 속도를 가지게 된다. 본 논문에서는 기존의 스위치드 커패시터의 전하 균일 성능이 떨어지는 이유를 분석하고 이를 보완하기 위한 제안된 회로

를 설명한다. 그리고 실험을 통하여 제안된 회로의 뛰어난 전하 균일 성능을 검증한다.

2. 제안하는 체인구조를 가지는 전하 균일 회로

그림 1은 기존의 스위치드 커패시터 회로의 구조와 각 모드에 따른 등가회로를 보여준다.

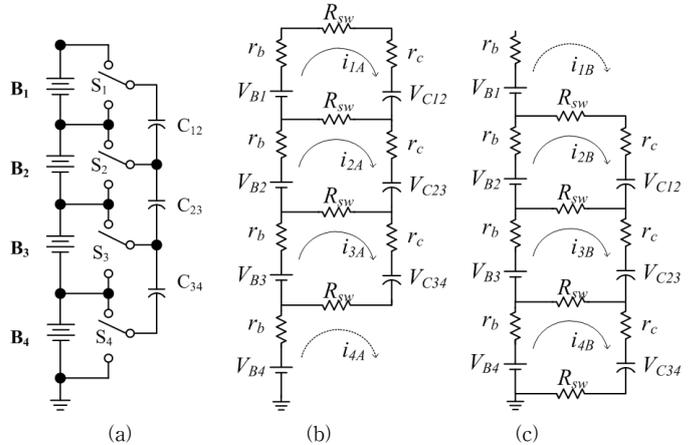


그림 1. 기존의 스위치드 커패시터 회로 (a) 회로 구조, (b) 모드 A의 등가회로, (c) 모드 B의 등가회로

각 모드의 등가회로부터 아래와 같이 각 모드에 따른 메쉬방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (V_{B1} - V_{B2})/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2R_{sw} + r_p & -R_{sw} & 0 & 0 \\ -R_{sw} & 2R_{sw} + r_p & -R_{sw} & 0 \\ 0 & -R_{sw} & 2R_{sw} + r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{2A} \\ i_{3A} \\ i_{4A} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ (V_{B2} - V_{B1})/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2R_{sw} + r_p & -R_{sw} & 0 \\ 0 & -R_{sw} & 2R_{sw} + r_p & -R_{sw} \\ 0 & 0 & -R_{sw} & 2R_{sw} + r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1B} \\ i_{2B} \\ i_{3B} \\ i_{4B} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 R_{sw} 는 스위치의 도통저항이며 r_p 는 r_b 와 r_c 의 합이며, r_b 와 r_c 는 각각 배터리 내부 임피던스와 커패시터의 직렬 등가 저항이다. 위의 식 (1),(2)를 통하여 아래와 같이 각 배터리로 흐르는 평균전류의 일반식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1A} + i_{1B} \\ i_{2A} + i_{2B} \\ \vdots \\ i_{(N-1)A} + i_{(N-1)B} \\ i_{NA} + i_{NB} \end{bmatrix} = \frac{1}{|i_{NB}|} \begin{bmatrix} X(N-1) \\ X(N-2) - X(N-1) \\ \vdots \\ X(1) - X(2) \\ 0 - X(1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X(N) = a^{N-1} - (N-2)a^{N-3} + \left(\sum_{k=1}^{N-4} k\right)a^{N-5} - \left(\sum_{m=1}^{N-6} \sum_{k=1}^m k\right)a^{N-7} + \dots$$

$$a = 2 + \frac{r_p}{R_{sw}}, \quad \sum_{k=1}^m k = 0 \quad (m < 1)$$

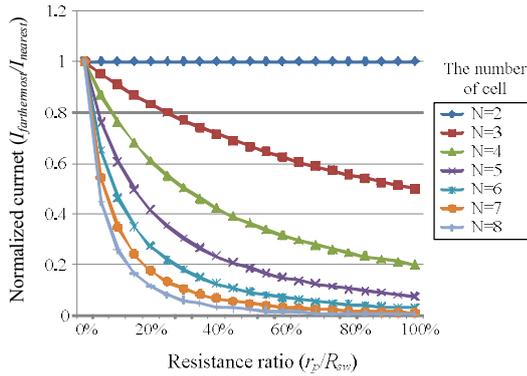


그림 2 셀 수와 기생성분에 따른 인접셀과 가장 멀리 떨어져 있는 셀 간의 전하 전달 비율

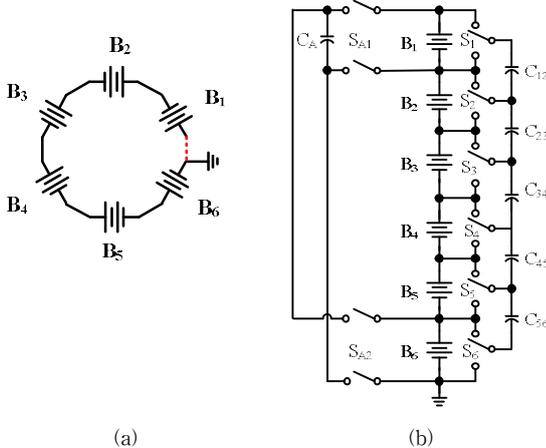


그림 3 제안하는 체인구조를 가지는 스위치드 커패시터 회로
(a) 회로 개념도, (b) 회로도

그림 2는 식 (3)에 의해서 그려진 셀 수와 기생성분에 따른 가장 인접한 셀과 가장 멀리 떨어져 있는 셀 간의 전하 전달 비율을 나타낸다. 이상적인 경우, 즉 배터리와 커패시터의 기생 직렬저항이 없을 경우는 셀 수와 무관하게 전달 비율이 1로 동일하게 전하 전달이 이루어지게 되나 실제 셀 수가 증가할수록 그리고 기생 저항이 커질수록 멀리 떨어져 있는 셀에 전달되는 전하량이 현저하게 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 대부분의 에너지는 인접 셀에만 전달되게 되고 멀리 떨어져 있는 셀에 전하를 전달하려면 인접 셀 간의 이동을 통해 순차적으로 이루어져야 하며 이는 전하 균일 속도를 저하시키는 요인이 된다.

그림 3은 제안하는 체인구조를 가지는 스위치드 커패시터의 개념도와 회로도이다. 앞에서 언급한 바와 같이 셀 수가 증가할수록 전하 전달 효율이 떨어지게 된다. 하지만 제안된 체인구조를 적용하게 되면 그림 3의 (a)와 같이 가장 멀리 떨어진 셀의 거리가 반으로 줄게 되며 실제 실패 셀의 개수는 반이 되어 전하 균일 성능이 좋아지게 된다. 그림 3 (b)는 제안된 구조를 적용한 회로도이다. 추가적인 두 개의 SPDT 스위치와 하나의 커패시터만을 추가하여 향상된 전하 균일 성능을 기대할 수 있다. 하지만 추가적인 두 개의 스위치의 전압 스트레스는 하나의 셀 전압을 전압 스트레스를 가지는 기존 SPDT 스위치와 달리 배터리 팩 전체의 전압을 가지게 된다는 단점이 있다.

3, 실험 결과

제안된 회로의 전하 균일 성능을 검증하기 위해서 15.5Ah의 용량을 가지는 리튬 이온 배터리 8개 셀에 대한 전하 균일 회로를 그림 4와 같이 제작하였다. 기존의 스위치드 커패시터는 8개의 SPDT 스위치와 7개의 커패시터로 구성되며, 제안하는 회로의 추가적인 부분은 그림 4의 영역A로서 2개의 SPDT 스위치와 1개의 커패시터로 구성된다.



그림 4. 제작된 전하균일 회로의 사진

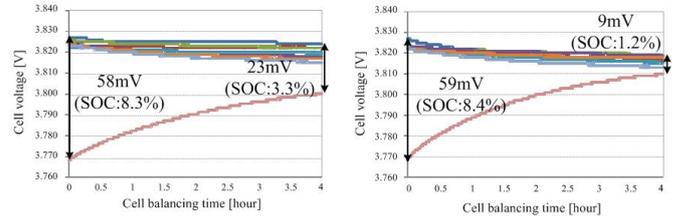


그림 5. 전하 균일 실험 결과, (a)기존회로, (b)제안된 회로

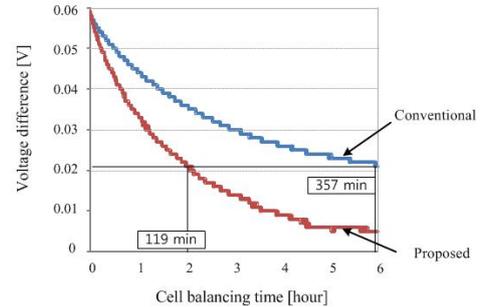


그림 6. 전하 균일 시간에 따른 셀 전압 차이

이러한 스위치들은 각각 듀티 0.45로 상보적으로 동작하며 동작 주파수는 50kHz이다. 그림 5는 4시간의 전하균일 동작 동안 각 배터리 셀의 전압 변동 추이를 보여주는 실험 결과이다. 기존의 회로의 경우 4시간 동작 후 23mV(SOC: 3.3%차이)의 전압차이를 보여줬으나 제안하는 회로는 9mV(SOC:1.2%차이) 정도로 제안하는 회로의 전하 균일 성능이 더 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 전하 균일이 진행됨에 따라 전압 차이를 나타내는 실험 결과이다. 예를 들어 SOC 3% (약 21mV) 이내로 들어오는 시간을 측정할 결과 기존의 회로는 357분이 걸리는 반면 제안하는 구조는 119분으로 그 시간이 현저하게 줄어들어 제안하는 회로의 빠른 전하 균일 성능을 검증할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 향상된 전하 균일 성능을 위하여 체인구조를 가지는 스위치드 커패시터 회로를 제안하였다. 기존의 회로와 마찬가지로 센싱 및 피드백이 필요 없이 간단하게 구현할 수 있다는 장점을 그대로 가져가면서 가장 상위 셀과 하위 셀을 연결하는 체인구조를 통해 실패 배터리 개수를 반으로 줄여 전하 균일 속도를 향상 시켰다. 15.5Ah 8개의 리튬이온 배터리용 프로토타입을 제작하였고, 실험을 통해 제안된 회로의 뛰어난 전하 균일 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012 0000981)

참고 문헌

- [1] S. W. Moore and P. J. Schneider, "A review of cell equalization methods for lithium-ion and lithium polymer battery systems," in Proc. SAE 2001 World Congress, Detroit, USA, Mar. 2001, Doc. number:2001-01-0959.
- [2] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in Proc. 12th Annu. Appl. Power Electron. Conf. and Exp., Atlanta, USA, Feb. 1997, pp. 848-854.
- [3] Baughman, A.C.; Ferdowsi, M. "Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 55, 2008, pp. 2277 - 2285