

# 배터리 팩 간의 순환전류 방지를 위한 양방향 DCDC 컨버터 연구

## Study of bidirectional DCDC converter to prevent circulating current between battery packs

이 승 현\*, 주 성 준\*\*★

Seunghyun Lee\*, Sungjun Joo\*\*★

### Abstract

In this paper, we propose a method to remove the circulating current which can occur in the parallel connection of the high voltage series connected battery module in the battery pack. The removal way is a method of inserting a module named VVSM (Variable Voltage Variable Module) using bidirectional DCDC converter and supercapacitor in place of one or some of the cascaded battery cells in the battery pack configuration. In this module, it operates like a battery cell that can be controlled at a desired voltage. VVSM is used to match the voltages of the cascaded battery modules very easily. To demonstrate the proposed method, a PSIM simulation for battery model is used. In addition, the module with only the battery cell connected in series and the module with the proposed VVSM are made, and the two modules were connected in parallel to measure the circulating current between the two modules. As a result, it was verified that the proposed method effectively suppressed the circulating current.

### 요 약

본 논문에서는 배터리 팩을 구성하는데 있어 높은 전압의 직렬 연결된 배터리 모듈의 병렬 연결에서 발생할 수 있는 순환 전류를 제거하는 방법을 제시하였다. 제거 방법은 배터리 팩의 구성상에 있어서 양방향 DCDC 컨버터와 슈퍼 캐패시터를 이용한 VVSM(Variable Voltage Variable Module)이라고 명명한 모듈을 직렬 연결된 배터리 셀들 중 하나 대신에 삽입하는 방식인데 VVSM은 이 모듈에서 마치 우리가 원하는 전압으로 제어할 수 있는 배터리 셀처럼 동작한다. 전압을 가변할 수 있는 배터리 셀(VVSM)을 이용하여 직렬 연결된 배터리 모듈의 전압을 아주 손쉽게 일치시킬 수 있었다. 제시한 방법을 증명하기 위해 배터리를 모형화한 모델을 이용하여 모의 실험을 시행 하였다. 또한 직렬 연결된 배터리 셀 만으로 된 모듈과 제안한 VVSM이 적용된 모듈을 실제 제작하여 두 모듈을 병렬 연결하여 둘 사이에 순환 전류를 측정하여 비교함으로써 제안된 방법이 효과적으로 순환 전류를 억제할 수 있음을 검증하였다.

*Key words : Litum battery, circulating current, bidirectional DCDC converter, Electric Vehicle battery pack, State of Health*

\* Dept. of Information Control Engineering, Hoseo University

\*\* Dept. of Digital Control Engineering, Hoseo University

★ Corresponding author

E-mail : yesdrjoo@hoseo.edu, Tel : +82-41-540-9966

※ Acknowledgment

Manuscript received Jun. 6, 2019; revised jun. 24, 2019; accepted Jun. 28, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

전기 자동차와 같은 곳에서 사용이 되는 배터리 팩은 충분한 전압과 전류를 공급하기 위해 배터리 셀을 직렬과 병렬로 연결하여 구성한다. 하지만 정 전압원에 가까운 배터리의 특성상 병렬로 연결된 배터리는 두 배터리간의 전압이 차이가 있을 때 큰 순환전류가 흐르게 된다. 배터리 팩의 경우 초기 병렬로 연결이 될 때 전류가 흘러 두 배터리간의 전압이 일치하게 되면 그 이후로는 무시할 수 있는 정도의 순환전류만 흐르게 된다. 하지만 배터리의 사용이 진행됨에 따라 각 배터리의 SOH(State Of Health) 특성 변화로 인하여 급속한 충전과 방전 시에 순간적으로 두 배터리의 전압이 달라지게 되어 이로 인한 큰 순환 전류가 흐르게 된다.

배터리 팩은 경우에 따라 단독으로 사용되는 경우도 있지만, 큰 전류를 요구하는 전기 자동차등에서는 이 배터리 팩은 병렬로 연결되어 사용된다. 병렬로 연결된 배터리 모듈 또는 팩에서는 일반적으로는 같은 전압으로 유지가 되고 있지만, 급속한 충전 또는 방전 시 각 배터리 모듈의 SOH(State Of Health : 잔존 수명) 특성으로 인해 두 배터리 모듈이나 팩 사이에 커다란 순환전류가 발생한다.

이 현상을 전기적 등가 모델로 설명하면 외부 단자 전압은 동일하다 하더라도 급속한 충전 및 방전 전류에 의해 배터리 내부의 등가 캐패시터의 전압이 가변하게 되는데 각 셀들의 캐패시터는 SOH에 의해 용량이 가변하게 되고 이 용량 값들은 서로 간에 점차로 달라지게 된다. 달라진 용량 값에 같은 전류를 충전하게 되면 내부 캐패시터의 전압이 달라지게 되고 이러한 전압차이를 셀의 내부저항으로 나누면 순환전류의 크기가 결정된다. 일반적으로 수 mΩ에 불과한 배터리에서는 모듈 또는 팩 간의 매우 큰 순환 전류를 발생시키고 이러한 순환 전류는 셀의 수명을 급속히 단축시키는 주요한 원인이 된다.

본 연구에서는 이처럼 순환전류의 원인이 되는 병렬 연결된 배터리 모듈 간의 전압 차이를 보상하기 위해 배터리 모듈에 직렬로 전압을 가변 할 수 있는 모듈을 삽입하여 두 모듈간의 전압을 맞추으로써 병렬연결 시 나타날 수 있는 순환전류를 제거 할 수 있는 방법을 제안하였다

본 논문이 제시한 전압을 가변 할 수 있는 배터리

모듈을 VVSM(Variable Voltage Storage Module: 가변 전압 저장 모듈)이라 명명하였고 이후로는 VVSM이라 부르기도 한다. VVSM은 양방향 DCDC 컨버터와 슈퍼 캐패시터 및 배터리 셀로 구성이 된다. 기본적인 동작은 슈퍼 캐패시터와 셀 사이에 양방향 DCDC 컨버터가 연결되어 슈퍼 캐패시터에 부하를 걸게 되면 배터리가 벅 컨버터를 통하여 슈퍼 캐패시터에 전류를 공급하여 외부로 전류를 공급하게 되고 반대로 슈터 캐패시터에 외부에서 전류를 충전하게 부스트 업 컨버터의 작용으로 배터리 셀을 충전하는 구조로 되어 있다. VVSM의 출력 단인 슈퍼 콘덴서는 배터리 모듈과 직렬연결이 되며, 직렬로 연결이 된 모듈 또는 팩 간의 달라지는 전압들에 대하여 VVSM은 이 전압들이 모두 같아지도록 제어하거나 순환전류를 모니터링하여 최소의 값이 되도록 제어하게 된다.

본 논문에서는 VVSM과 순환전류에 관련한 회로 분석과 시뮬레이션을 시행하였고, 실제 VVSM을 채택한 배터리 모듈과 채택하지 않은 직렬로 연결된 배터리모듈을 병렬 연결하여, VVSM을 채택한 배터리 모듈이 순환전류를 억제할 수 있음을 실험으로 보였다.

## II. 본론

### 1. 리튬 이온 배터리

2차 전지인 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 저장 밀도를 가지며 에너지 저장 장치 및 전기 자동차 분야에 사용되고 있다. 본 논문 실험에 사용된 Samsung ICR18650-22F 배터리 하나의 정격 용량은 3.7V / 2.2Ah이다.

#### (1) 리튬 이온 배터리의 특성

본 논문에서 개선 할 배터리 모듈의 문제점은 각각의 배터리의 SOH특성으로 인해 발생하는 배터리 모듈 내부 순환 전류이다. 순환 전류는 배터리의 전압의 차이로 인해 생기게 된다. 배터리의 전압은 그림 1과 같이 충전된 용량에 따라 나타나게 된다. 그림 1의 그래프는 충전과 방전 후, 휴지 시간을 이후의 OCV(Open Circuit Voltage : 개방 시 전압)를 나타낸 그래프이다. Y축은 OCV상태의 전압이고 X축은 SOC(State Of Charge : 충전 상태)이다. 최대 정격 용량에서 사용할 수 있는 비율을

SOC을 표기하며, 배터리의 전압은 SOC에 비례하여 변화된다.[1]

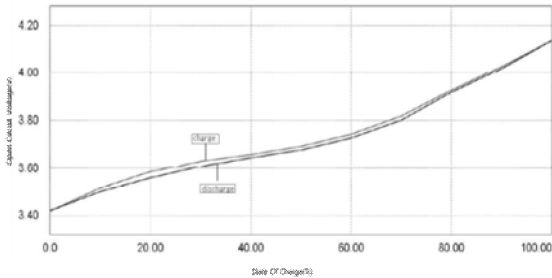


Fig. 1. Open circuit voltage due to charging capacity [1].  
그림 1. 충전 용량에 따른 개회로 배터리 전압[1]

Table 1 Samsung ICR18650-22F data [2]  
표 1 삼성 ICR18650-22F 데이터[2]

Item	Specifications
Rated capacity	2200mAh
Charging voltage	4.2V±0.05V
Rated voltage	3.6V
Maximum Charge Current	1C-rate(2200mA)
Maximum discharge current	2C-rate(4400mA)
Discharge end voltage	2.75V

배터리의 오랜 사용으로 인해 정격 용량이 변화되면, 급속한 충전 또는 방전 전류에 의해 각 배터리의 전압이 변화하게 된다.[3] 배터리 모듈은 여러 개의 배터리가 직렬로 연결되어 있으므로, 연결된 배터리의 수만큼 모듈간의 전압의 차이가 크게 발생하게 되고 이러한 전압차이는 전압이 높은 모듈에서 낮은 전압의 모듈로 큰 순환 전류가 발생하게 된다. 수명 말기가 된 배터리팩의 경우 충전 동작에는 다른 팩보다 전압이 빨리 올라가게 되고 반대로 방전 동작에는 훨씬 더 빨리 떨어지게 가장 오래된 배터리 일수록 순환전류가 집중적으로 흐르게 되어 훨씬 더 빨리 망가지게 된다.

(2) 전기적 모델

배터리 전기적 모델을 사용하여 배터리 모듈의 전압 차에 의해 발생하는 순환 전류에 대하여 PSIM을 사용하여 모의 실험하였다. 모의 실험을 진행하기 위하여 많은 배터리의 모델 중에서 그림 2와 같이 기본적인 모델 중에서 테브난 모델 (Thevenin model)을 사용하여 진행하였다. 테브난 모델은 배터리 모델의 기본적인 모델이며 개방 회로에서 순

간적으로 부하가 발생하였을 때 변화하는 배터리의 전압을 나타내는 모델이다. 그림 2에서 E는 배터리 내부 전압, R1은 전압의 변화에 따라 시간 지연 없이 선형적으로 변화하는 배터리의 내부 저항, R2와 C는 충전 및 방전 전류에 의한 손실 저항과 콘덴서이다.

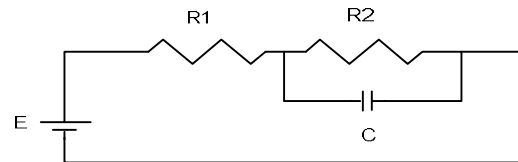


Fig. 2. Battery electrical model [4].  
그림.2. 배터리 전기적 모델[4]

배터리 전압 E를 제외한 R1, R2, C의 파라미터는 실험의 데이터를 기반으로 한 수식을 통해 구해진다. 실험은 하나의 리튬 이온 배터리를 충전 또는 방전한 후 1시간의 휴식 시간이후에 배터리에 0.8Ω을 연결 하였다.

배터리의 파라미터는 방전 중인 배터리의 전압 그래프에서 구할 수 있다.

$$F(x) = E - I_{OUT} * (R1 + R2(1 - e^{(-x/R2 * C)})) \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 F(x)를 구하여 나온 결과를 그림 3의 주황색 그래프로 표현하였다. 이 시뮬레이션 그래프와 실제 배터리의 방전 전압 그래프인 그림 3의 파란색 그래프를 비교하여 배터리의 파라미터를 구할 수 있다. 그래프의 시작과 끝나는 점을 일치시키며, 오차는 최대 3% 이내인 파라미터의 값은 R1 130mΩ, R2 43mΩ, C 1000F이다.

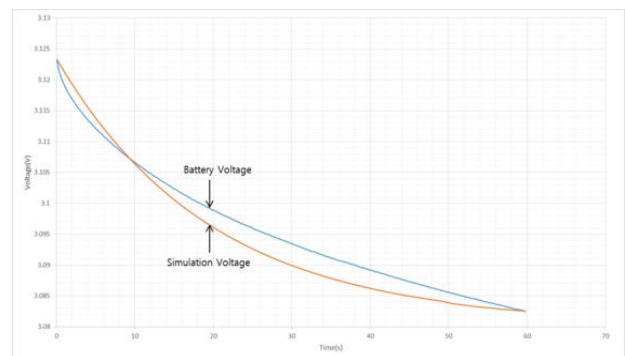


Fig. 3. Battery discharge status measurement and simulation comparison graph.  
그림.3. 배터리 방전 상태의 측정과 시뮬레이션 비교 그래프

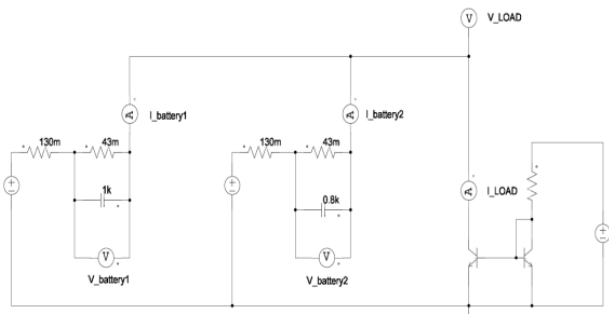


Fig. 4. Cycle current simulation circuit with battery capacity change.

그림 4. 배터리 용량 변화에 따른 순환 전류 시뮬레이션회로

그림 4는 실험으로 구한 전기적 모델을 파라미터를 사용한 등가 모델을 나타낸 그림이다. 여기서 battery1은 내부 캐패시터의 값을 1000F인 정상 배터리로 간주하였고 battery2는 수명 말기의 배터리를 모의하기 위해 캐패시터의 값을 800F으로 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5는 방전 동작 시에 배터리가 병렬로 연결 되어 있어 같은 단자 전압을 유지하고 있지만, 급격한 방전 전류를 가하면 battery2의 전류가 일시적으로 충전을 하는 것과 두 모듈 사이에 전류가 다르게 흐르는 것을 알 수 있다.

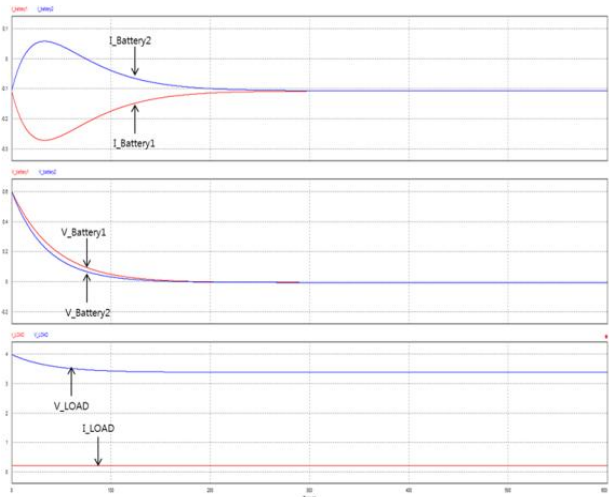


Fig. 5. Simulation of circulation current with battery capacity change.

그림 5. 배터리 용량 변화에 따른 순환 전류 시뮬레이션

## 2. 양방향 DC-DC 컨버터

본 논문에서 사용된 DC-DC 컨버터는 VVSM에 연결된 배터리를 충전과 방전하기 위해 그림 6과 같은 형태의 양방향 컨버터를 채택하였다. 이 컨버

터는 양방향 컨버터로 V1과 V2의 전압에 의해 V2전압 보다 높아지게 된다.[5]

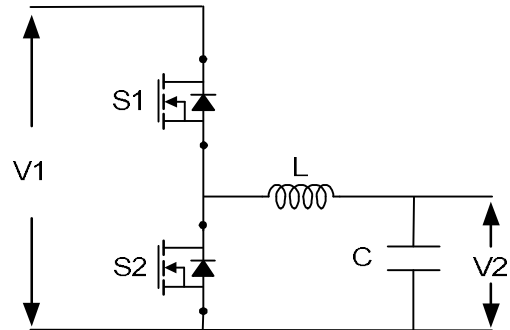


Fig. 6. Bi-directional synchronous converter.

그림 6. 양 방향 동기식 컨버터

제안된 VVSM의 경우 DCDC의 V1측이 배터리로 연결되고 V2는 출력단에 연결되는데 먼저 배터리 셀로부터 슈퍼 캐패시터로 전력을 주기위해서 먼저 상측 부 스위치인 S1이 턴 온 되고 하측 부 스위치인 S2가 턴 오프 되었을 때, 그림 7의 좌측과 같이 동작 되게 된다. 상측 부 스위치 S1이 턴 오프 되었을 때, 하측 부 스위치인 S2의 바디 다이오드를 통해 전류를 전달하고 그림 7의 우측처럼 하측 부 스위치인 S2가 턴 온 됨으로써 S2 양단의 전압이 0 전압 조건이 된다.[6]

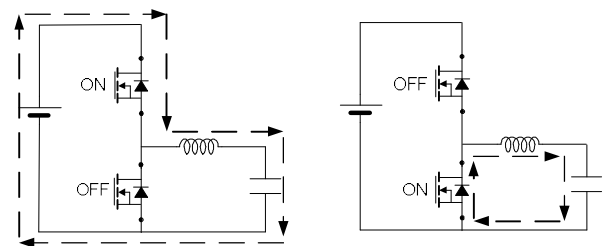


Fig. 7. Bidirectional step-down converter operation.

그림 7. 양방향 강압 컨버터 동작

반대로 슈퍼 콘덴서로부터 배터리 셀을 충전을 위해서는 승압 컨버터 형식으로 동작되게 된다. 스위치의 동작에서 하측 부 스위치인 S2가 턴 온 되고 상측 부 스위치인 S1이 턴 오프 되었을 때, 그림 8의 좌측과 같이 동작 되게 된다. 스위치 S2가 턴 오프 되었을 때, 상측 부 스위치인 S1의 바디 다이오드를 통해 전류를 전달하고 이때 상측 부 스위치인 S1이 턴 온 됨으로써 S1 양단의 전압이 0 전압 조건이 된다.[6]

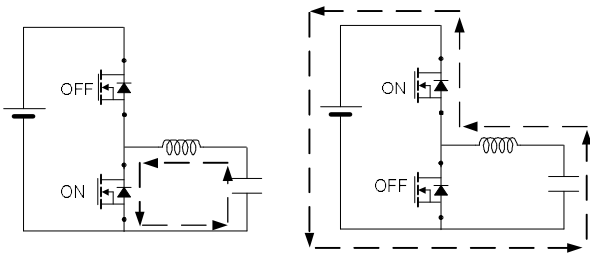


Fig. 8. Bidirectional Boost Converter Operation.  
그림 8. 양방향 승압 컨버터 동작

3. VVSM을 이용한 배터리 모듈 구성

그림 9에서 직렬 연결된 배터리 모듈과 VVSM이 직렬 연결된 배터리 모듈의 구성도이다. VVSM의 전압은 상위 제어기에서 각 모듈의 배터리 셀만의 전압과 요구되는 출력 전압의 차이로 결정되게 된다. 양 방향 DCDC의 경우 출력 캐패시터의 전압이 목표 전압과 같아지도록 항상 제어하고 있으며 만일 목표 전압과 같아지면 상, 하측 MOSFET는 스위칭을 멈추게 되어 슬립 모드로 대기하게 되어 있다.

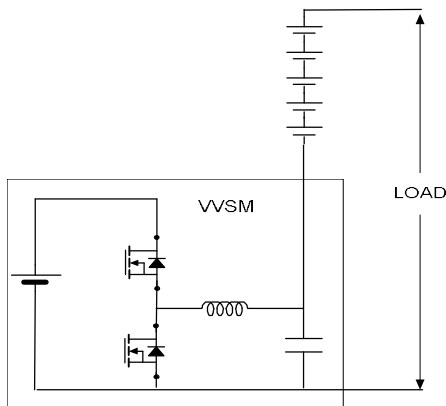


Fig. 9. Basic configuration of VVSM.  
그림 9. VVSM의 기본 구성도

본 논문에서 설계된 양방향 DC-DC 컨버터의 출력 조건은 표 2의 사양과 같다.

Tabld 2. Converter Specifications.

표 2. 컨버터의 사양

Item	Value	Unit
$V_{IN}$	9	V
$V_{OUT}$	8	V
$I_{OUT}$	4	A
$\Delta I_{OUT}$	0.1	A
Frequency	200	kHz

위 사양에 맞도록 인덕터를 설계하여 보면 정상 상태에서 상측 스위치 온 시간이  $0 < t < DT$  일 때, 인덕터에 인가되는 전압  $V_L$ 은

$$V_L = V_{IN} - V_{OUT} \tag{식 2}$$

인덕터의 전류  $I_L$ 과 인덕터 전압  $V_L$ 의 관계식은

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \tag{식 3}$$

식 2와 식3을 통해 식 4를 구할 수 있으며,  $0 < t < DT$  동안 인덕터 전류  $I_L$ 의 전류 리플  $\Delta I_L$ 은

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT \tag{식 4}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT \tag{식 5}$$

가 된다. 전류 리플  $\Delta I_L$ 은 정격 출력 전류를 기준으로 동작됨으로

$$I_{MAX} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT \right) \tag{식 6}$$

$$I_{MIN} = I_o - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT \right) \tag{식 7}$$

가 된다. 식 9와 식 10으로부터  $\Delta I_o$ 는

$$\Delta I_o = \frac{V_{\in} - V_{OUT}}{L} DT = \frac{V_{OUT}(V_{\in} - V_{OUT})}{V_{\in} L f} \tag{식 8}$$

식을 인덕터로 정리하게 되면

$$L = \frac{V_{OUT}(V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} f \Delta I_o} \tag{식 9}$$

식 9에 표 2의 컨버터 사양을 대입하여

$$L = \frac{8V * (9V - 8V)}{9V * 200kHz * 0.1A} = 4.5\mu H \tag{식 10}$$

본 연구에서는 식 10에서 나온 인덕터보다 3배의 여유를 주어  $15\mu H$ 를 사용하였다.

콘덴서의 경우 배터리와 직렬로 연결되어 사용되기에 배터리의 역할을 해야 한다. 배터리 전기적 모델에서의 배터리의 콘덴서의 값은  $1000F$ 이다. 컨버터의 수식으로 구하게 되는 콘덴서는 VVSM에서 순간적으로 공급해야 하는 에너지를 저장하지

못하고 있다.

그림 10은 배터리의 전기적 모델과 콘덴서를 직렬 연결하여 부하 전류를 인가하는 시뮬레이션 회로이다. 시뮬레이션은 PSIM으로 진행하였다.

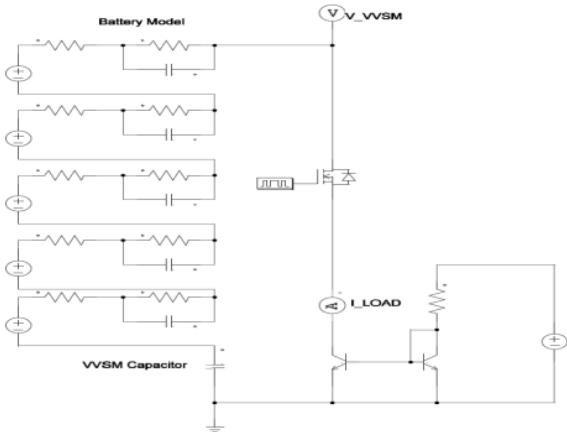


Fig. 10. Simulation circuit for series connection of battery model and capacitor.

그림 10. 배터리 모델과 콘덴서의 직렬연결 시뮬레이션 회로

그림 11은 그림 10에서 VVSM의 콘덴서 값을 470 $\mu$ F, 초기 전압은 4V라고 설정하여 진행한 시뮬레이션 그래프이다. 부하 전류가 인가되는 순간, 에너지를 공급 하지 못 하고 것을 그래프로 확인 할 수 있다.

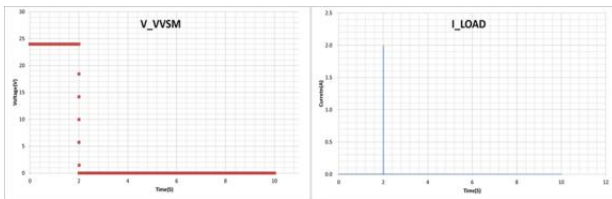


Fig. 11. Simulation graph (470 $\mu$ F) with battery and super capacitor connected in series.

그림 11. 배터리와 슈퍼 콘덴서 직렬 연결한 시뮬레이션 그래프(470 $\mu$ F)

그림 12은 그림 10에서 VVSM의 콘덴서 값을 3F, 초기 전압은 4V라고 설정하여 진행한 시뮬레이션 그래프이다. 부하 전류가 인가된 후, 부하의 전류를 공급하는 것을 그래프를 통해 확인 수 있다. VVSM 출력의 콘덴서가 배터리의 역할을 수행하기 위해 컨버터의 수식으로 계산되어 나온 값이 아닌 슈퍼 콘덴서를 연결 하였다.

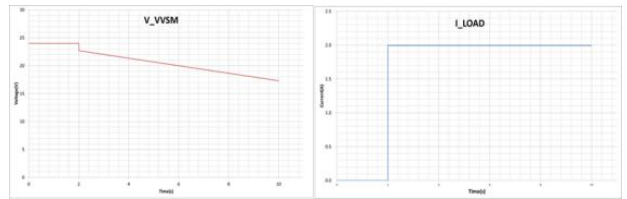


Fig. 12. Simulation graph (3F) with battery and super capacitor connected in series.

그림 12. 배터리와 슈퍼 콘덴서 직렬 연결한 시뮬레이션 그래프 (3F)

#### 4. 실험 및 결과

VVSM이 배터리의 전압을 판단하여 정상적으로 제어를 하여 전압을 보상하는지 실험을 통해 확인 하였다. 이 VVSM 채택한 배터리 모듈과 채택하지 않은 배터리 모듈의 순환 전류를 실험을 통해 확인 하고 비교 하였다.

##### (1) VVSM 동작 실험

VVSM은 배터리의 전압을 측정하여 상시 전압을 유지하는 것을 그림 15 회로의 실험을 통해 확인하였다. 하단에 VVSM의 출력 콘덴서를 기준으로 5개의 배터리를 직렬 연결하였다. 그림 15에서 C1은 부하의 전류, C3는 VVSM의 콘덴서 전압,



Fig. 13. Actual circuit picture of VVSM.

그림 13. VVSM의 실제 회로 사진

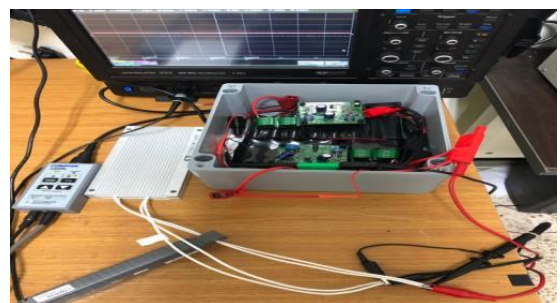


Fig. 14. Experimental picture of VVSM.

그림 14. VVSM의 실험 사진



C4는 전체 배터리 모듈의 전압이다. 5개의 배터리 전압을 기준으로 부족한 전압을 VVSM이 보상하여 상시 전압이 유지되는 것을 그림 16로 확인할 수 있다. 부하 전류와 상관없이 배터리 모듈의 전압이 24.7V를 유지 하는 것을 확인할 수 있다.

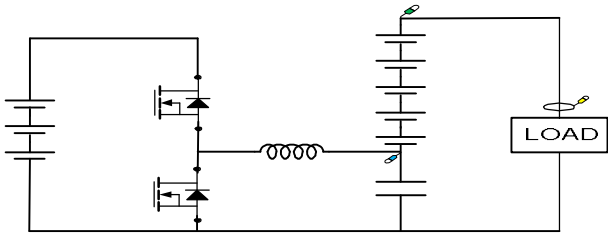


Fig. 15. VWSM Voltage Regulation Circuit.  
그림 15. WSM 전압 유지 실험 회로

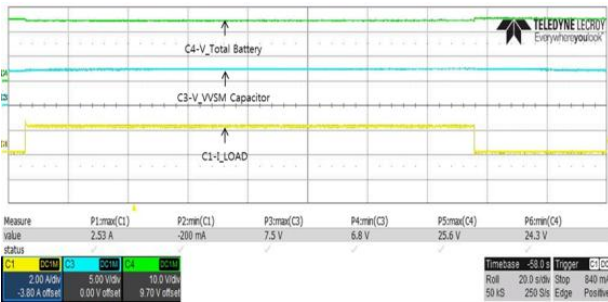


Fig. 16. Experiment of battery module voltage maintenance including VVSM.  
그림.16. WSM을 포함한 배터리 모듈 전압 유지 실험

(2) 기본적인 구조의 순환 전류 실험

시뮬레이션에서 배터리 모듈이 서로 다른 SOC (State Of Charge : 충전 상태)를 보유 한 상태에서 병렬 연결하여 순환 전류가 발생 한 것을 확인하였다. 실험의 연결 방법은 그림 17의 회로와 같이 진행하였다. 두 개의 배터리 모듈의 순환 전류를 확인하기 위해 그림 17의 노란색 표시된 것처럼 전류 프로브에 들어가는 선의 방향을 반대로 하였다. 부하 전류의 여부도 동시에 확인해야하기 때문에 그림 17의 분홍색 표시와 같이 연결하였다. 그림 17에서 C1은 노란색으로 배터리 모듈의 순환 전류, C2는 분홍색으로 부하 전류를 측정하고 있다.

배터리는 SOC 40% 차이를 유지하기 위하여 18.4V와 16.5V로 병렬 연결하였다. 두 배터리 모듈을 연결한 상태에서 부하 전류가 없는 상태에서의 순환 전류의 흐름과 로드가 발생하였을 때의 순환 전류의 흐름을 측정하였다. 그림 18을 확인하면 두

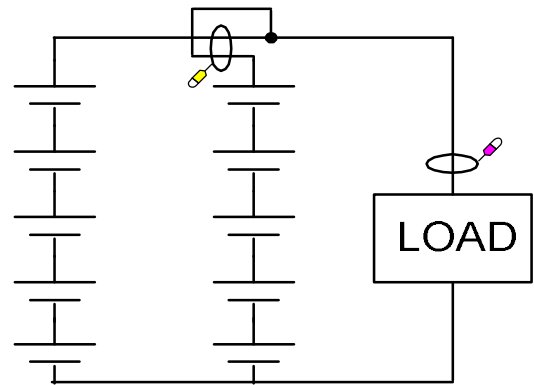


Fig. 17. Cycle current of basic battery module connection structure.

그림 17. 기본 배터리 모듈 연결 구조의 순환 전류

배터리 모듈의 전압의 차이가 존재하여 3.2A가 측정된 것을 확인할 수 있다. 순환 전류를 측정하는 C1의 프로브 연결을 보면 배터리 모듈의 출력 케이블의 방향이 반대로 측정하고 있다. 부하 전류가 인가되면 같은 전류를 방전해야 하기에 0A가 측정되어야 하지만, 부하 전류가 인가되기 전에도 존재하므로 순환전류는 부하 전류와 상관 없이 존재하게 된다.

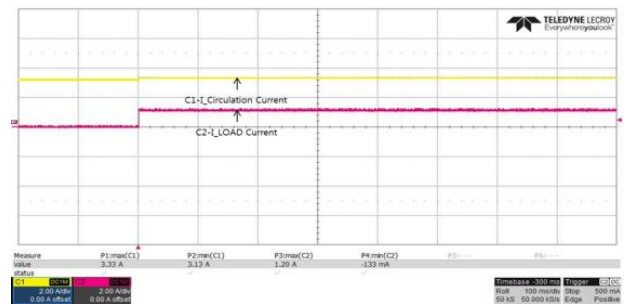


Fig. 18. Graph of circulation current between battery modules with SOC 40% difference.

그림 18. SOC 40%차이의 배터리모듈 간의 순환전류 그래프

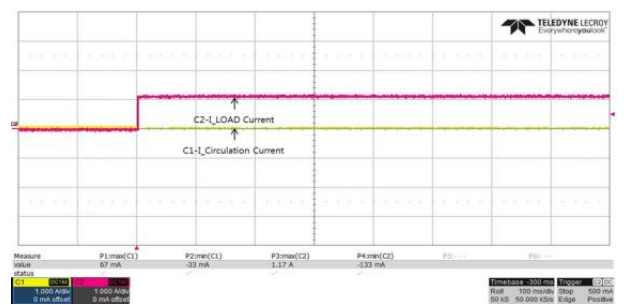


Fig. 19. Graph of circulation current between battery modules with SOC 10% difference

그림 19. SOC 10% 차이의 배터리 모듈 간의 순환전류 그래프

SOC(State of charge) 10% 차이를 유지하기 위하여 18.4V와 18.6V를 병렬 연결하였다. 그림 19을 확인하면 두 배터리 모듈의 전압의 차이가 존재하여 부하 전류와 상관없이 60mA가 측정된 것을 확인할 수 있다.

### (3) VVSM을 채택한 구조의 순환 전류 실험

VVSM을 채택한 배터리 모듈을 2개를 병렬 연결하여 순환 전류를 확인하였다. 두 개의 배터리 모듈의 순환 전류를 확인하기 위해 그림 20의 노란색 표시와 같이 전류 프로브에 들어가는 선의 방향을 반대로 연결하였다. 부하 전류의 여부도 동시에 확인해야하기 때문에 그림 20의 분홍색 표시와 같이 연결하였다. 그림 20에서 C1은 배터리 모듈의 순환 전류, C2는 부하 전류를 측정하고 있다. 그림 21을 확인하면 배터리 모듈은 24V를 유지하고 있는 상태이다. 부하의 전류의 여부와 상관없이 순환 전류가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

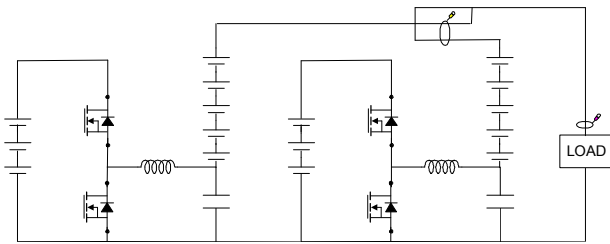


Fig. 20. VVSM circulation current test circuit.  
그림 20. VVSM 순환 전류 실험 회로

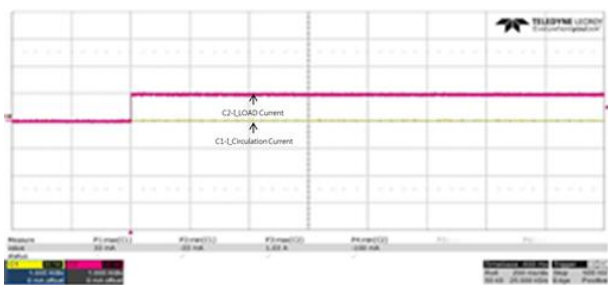


Fig. 21. Battery module circulation current experiment including VVSM.  
그림 21. VVSM을 포함한 배터리 모듈 순환 전류 실험

### III. 결론

본 논문에서는 배터리 병렬 구조에서 SOH 특성 차이로 인하여 급속한 방전 또는 충전에서 발생할 수 있는 배터리 모듈 내부의 순환 전류가 발생할

수 있음을 모의실험과 실험으로 증명하였다. 이러한 순환 전류는 배터리 모듈의 수명을 급격히 떨어뜨리게 된다. 본 논문에서는 이러한 순환 전류를 획기적으로 제거하기 위하여 VVSM(Variable Voltage Storage Module)이라고 하는 슈퍼 캐패시터와 배터리 셀을 양방향 DCDC로 연결한 구조를 제안하였다. 직렬 셀로 구성된 배터리 모듈의 출력단에 VVSM의 출력인 슈퍼 캐패시터가 직렬로 연결되고 슈퍼 캐패시터의 전압을 제어하여 병렬 연결된 모듈들 간의 전압 차이를 제거하게 된다. 본 논문에서는 제시된 VVSM이 효과적으로 순환전류를 제거하였음을 실제 세트를 제작하여 증명하였다. 따라서 제시된 VVSM이 실제 동력 전지에 사용이 될 경우 동력전지의 수명을 늘릴 수 있음을 보였다.

### References

- [1] Jae-Kwan Im., Deok-Young Lim, Novie Ayub Windarko, Jaeho Choi, Gyo-Bum Chung "Electrical Modeling of Lithium-Polymer Battery," *THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS* Vol.16, NO.2, pp.199-207, 2011. DOI: 10.6113/TKPE.2011.16.2.199
- [2] SAMSUNG SDI "ICR18650-22F DATASHEET"
- [3] Hyung-Teak Kim, Jin-Young Choi, Young-Gu Park "A Study on the Cycle Life of Large Capacity Lithium Batteries," *Korea Society of Energy & Climate Change, Journal of Energy & Climate Change* 13 Vol.13, No.2, pp.102-109, 2018.
- [4] Lijun Gao, Shengyi Liu, and Roger A. Dougal, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation," *IEEE*, VOL.25, NO.3, pp.495-505, 2002. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.803653
- [5] Kostiantyn Tytelmaier, Oleksandr Husev, Oleksandr Veligorskyi, Roman Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," *IEEE*, 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 2016. DOI: 10.1109/YSF.2016.7753752
- [6] Junhong Zhang, Jih-Sheng Lai, Rae-Young Kim, Wensong Yu, "High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional



dc-dc Converter," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL.22, NO.4, 2007.

DOI: 10.1109/TPEL.2007.900462

---

## BIOGRAPHY

---

### Seunghyun Lee (Member)



2010~2016 : Bachelor of Information Control Engineering, Hoseo University

2017~2019 : Graduate School of Information and Control Engineering, Hoseo University

### Sungjun Joo (Member)



1997 : Ph.D of Electrical Engineering, Seoul National University.

1997~2001 : Samsung Electronics co. Ltd. Senior Engineer.

2001~2012 : Interpion Semiconductor CEO& President

2007~2019 : Professor, Hoseo University Dept. of Digital Control Engineering, Hoseo University