

영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기

(New Secondary Battery Charger/Discharger Available for Zero Voltage Discharge)

정대택* · 채수용 · 홍순찬**

(Dae-Taek Chung · Soo-Yong Chae · Soon-Chan Hong)

Abstract

This paper proposes a new secondary battery charger/discharger available for zero voltage discharge which is used for test equipments and formation process. The proposed system is a switching type converter, and thus the system is high efficiency and more compact as compared with linear type charger/discharger. Conventional switching type charger/discharger can not discharge secondary batteries to zero voltage because of voltage drops in the switching elements and long distributing line(typically 10m). However, the proposed system is able to discharge the battery to zero voltage in constant current mode regardless of the voltage drops. In this paper, we analyze the proposed charger/discharger and the validity of the system is verified by simulation and experiment.

Key Words : Secondary Battery, Zero Voltage Discharge, Bidirectional Converter

1. 서 론

최근 휴대용 전자기기의 보급과 전기자동차의 상용화로 인하여 이러한 장치의 전원으로 2차전지의 수요가 지속적으로 증가하는 추세이다. 2차전지의 제조 공정은 크게 전지 조립공정인 전공정과 전지 시험공

정인 후공정으로 나눌 수 있다. 전지의 후공정은 전지의 형태를 만드는 조립공정을 거친 후 아직까지는 전기적 특성을 가지지 않은 전공정 상태의 전지를 정해진 공정에 따라 충전과 방전을 반복하여 전기적 특성을 가지도록 하는 활성화 공정(Forming process)과 전지의 성능과 수명을 시험하기 위한 시험공정(Test process)으로 구성된다. 활성화 공정에서는 전지의 사용전압 범위에서 충방전하며, 시험공정에서는 방전시에 0V까지 방전하여야 한다.

이러한 2차전지의 활성화 및 성능시험에 사용되는 충방전기는 전지의 특성을 잘 고려하여 설계되어야 한다. 2차전지는 용도에 따라 여러 종류가 사용되고 있으며 표 1에서 보는 바와 같이 전지의 종류에 따라 다양한 사용전압 범위를 가지고 있다. 그 중에서 가장 많이 사용하는 리튬 계열의 2차전지는 보통 2.5V~

* 주저자 : 단국대학교 대학원 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 단국대학교 전자전기공학부 교수
* Main author : Doctor's course Department of Electrical Engineering, Dankook University
** Corresponding author : Professor Division of Electronics & Electrical Eng., Dankook University
Tel : 031-8005-3609, Fax : 031-897-3610
E-mail : schong@dku.eduabc@abc.ac.kr
접수일자 : 2012년 8월 31일
1차심사 : 2012년 9월 4일
심사완료 : 2012년 10월 12일

4.2V 전압 범위에서 사용되고 있으나 최근 들어서는 새로운 소재 개발 등으로 인하여 더 낮은 전압 범위에서도 사용할 수 있는 전지가 개발되고 있다.

표 1. 2차전지의 종류별 전압
Table 1. Working voltage of various secondary batteries

종 류	공칭전압(V)	사용전압 범위(V)
니켈 카드뮴(Ni-Cd)	1.2	1~1.8
니켈 수소(Ni-MH)	1.2	1~1.8
리튬 이온(Li-ion)	3.7	2.5~4.2
리튬 폴리머 (Li-ion polymer)	3.7	2.5~4.2
리튬 인산철(LiFePO4)	3.3	2.0~3.65
EDLC(Electric Double Layer Capacitor)	-	0~2.7

이와 같이 다양한 전압범위를 가지는 2차전지를 충전시키기 위해서는 넓은 전압범위 특히 2V 이하의 낮은 전압 영역에서도 정상적으로 충방전을 수행할 수 있는 충방전기가 필요하다. 하지만 기존의 충방전기는 회로의 스위칭 소자들과 부하배선(일반적으로 10m)에서의 전압강하로 인해 방전가능 전압에 한계를 가지고 있다.

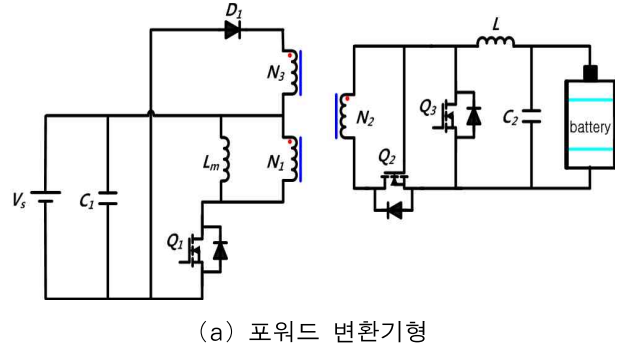
본 논문에서는 스위칭 소자 및 긴 부하배선에서 전압강하가 발생하더라도 2차전지를 원하는 전압까지 충방전할 수 있는 새로운 방식의 2차전지 충방전기를 제안한다.

2. 기존의 2차전지 충방전기

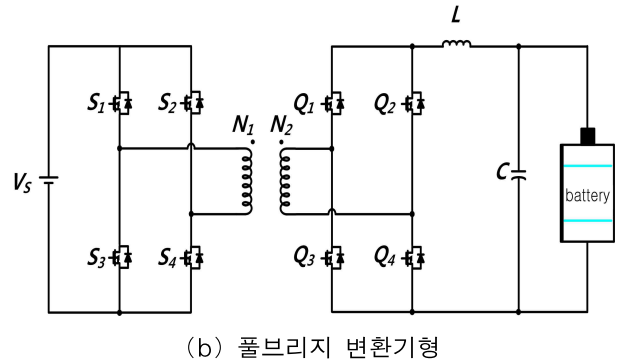
2차전지 충방전기는 충전시에는 고압을 저압으로 변환하고 방전시에는 저압을 고압으로 변환해야하므로 변압기를 포함한 절연형 변환기가 주로 사용된다. 현재 사용되고 있는 대표적인 스위칭 방식 충방전기는 그림 1과 같은 파워드 변환기[1]나 풀브리지 변환기[2,3] 구조를 사용한 충방전기가 있다.

그림 1 (a)는 파워드 변환기형 충방전기로 용량이 낮은 2차전지에 주로 사용되며, 그림 1 (b)는 풀브리지

변환기형 충방전기로 중대형 용량의 2차전지 충방전기에 주로 사용된다. 하지만 그림 1과 같은 기존의 스위칭 충방전기는 스위칭 소자 및 긴 부하배선에서의 전압강하로 인해 방전할 수 있는 전압에 한계를 가지고 있다. 이러한 전압강하를 고려할 때 기존 스위칭 충방전기의 방전가능 하한전압은 대략 2V 정도이다.



(a) 파워드 변환기형



(b) 풀브리지 변환기형

그림 1. 기존의 스위칭 방식 충방전기
 Fig. 1. Existing switching type charger/discharger

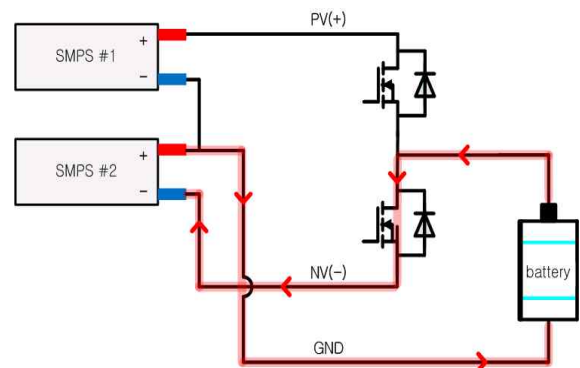


그림 2. 기존의 리니어 방식 충방전기
 Fig. 2. Existing linear type charger/discharger

영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기

그림 2는 기존의 리니어 방식 충방전기의 방전전류 경로를 나타낸다. 리니어 방식에서는 그림 2와 같이 별도의 전원 SMPS #2를 이용하여 방전 FET의 소스 단자에 음(-)의 전위를 걸어줌으로써 영전압 방전 구현이 가능하다. 하지만 리니어 방식 충방전기에서는 영전압 방전을 구현하기 위해 별도의 전원이 필요하고 FET의 Active 영역을 사용함으로써 소자에서의 손실이 커서 효율이 매우 낮은 단점이 있다.

따라서 기존의 스위칭 방식 충방전기는 리튬계열 2차전지의 일부 활성화 공정에는 적용이 가능하지만 영전압 방전이 필요한 시험공정과 그 외 사용전압 범위가 낮은 2차전지 및 EDLC에는 사용할 수 없다.

이러한 이유로 현재 2V 이하 방전이 필요한 경우에는 그림 2와 같은 리니어 방식 충방전기를 사용하고 있다. 리니어 방식 충방전기는 구현이 간단하다는 이점이 있지만 효율이 낮고 영전압 방전을 구현하기 위한 전원장치가 별도로 필요하며 방전 에너지를 회수할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

3. 제안한 영전압 충방전기

3.1 충방전기의 구성

본 논문에서 제안한 영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기는 그림 3과 같다.

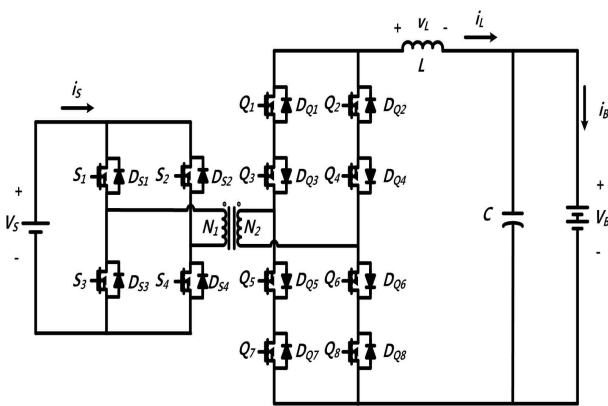


그림 3. 제안한 영전압 방전이 가능한 충방전기
Fig. 3. Proposed charger/discharger available for zero voltage discharge

그림 3에서 변압기의 1차 측 스위치 $S_1 \sim S_4$ 는 메인 스위치로서 충전 및 방전시 듀티비 가변을 통해 전지의 전압 또는 전류를 제어하는 역할을 한다. 변압기 2차 측의 Q_1, Q_2, Q_7, Q_8 은 방전시 사용되는 스위치로서 충전시에는 게이트 신호가 인가되지 않는다. 변압기 2차 측의 $Q_3 \sim Q_6$ 은 충전시 사용되는 스위치로서 방전시에는 게이트 신호가 인가되지 않는다. 또한 $Q_3 \sim Q_6$ 은 방전시에 변압기 2차 측 회로가 단락되는 것을 방지하는 중요한 역할을 한다.

제안한 충방전기는 기존의 풀브리지 변환기형 충방전기에 비해 능동스위치 4개가 추가되었지만 기존의 스위칭 방식 충방전기에서는 구현할 수 없었던 영전압 방전이 가능하다. 또한 리니어 방식 충방전기와는 달리 영전압 방전 구현을 위한 별도의 전원이 필요 없다는 장점이 있다.

3.2 충전동작 해석

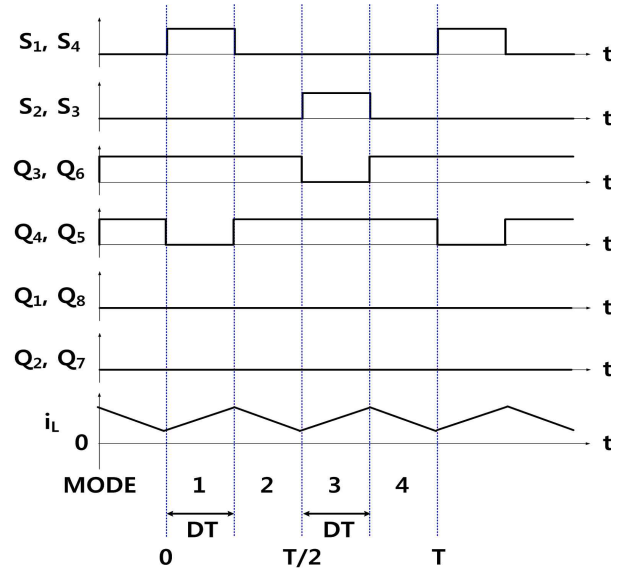


그림 4. 충전시 게이트 파형
Fig. 4. Gate signals in charging process

2차전지를 충전할 때에는 먼저 전지의 전압이 충전상한전압에 도달할 때까지는 정전류(CC, Constant Current) 모드로 충전하고 충전상한전압에 도달한 후에는 정전압(CV, Constant Voltage) 모드로 충전하게

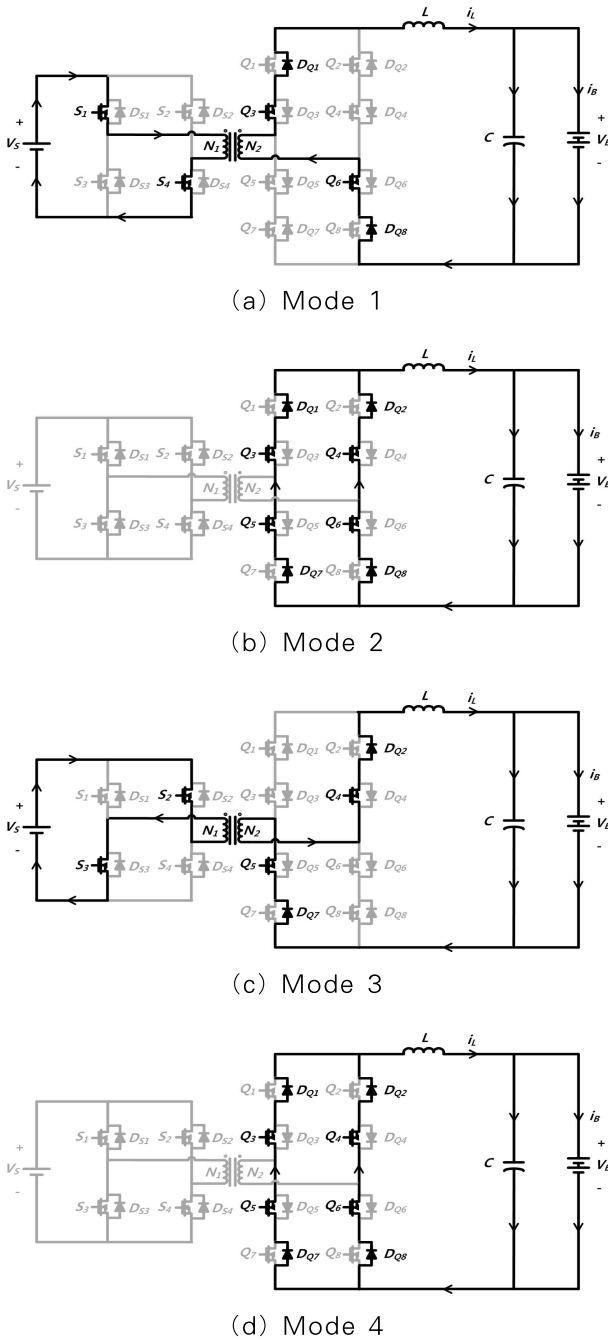


그림 5. 충전시 모드별 동작
Fig. 5. Mode operations in charging process

된다. 제안한 충방전기의 충전시 게이트 파형 및 인덕터 전류파형은 그림 4와 같으며, 4개 모드로 충전동작이 이루어진다.

그림 4와 같이 충전시에는 S_1 과 S_4 가 듀티비 D 로 동작하고 S_2 와 S_3 은 S_1 과 S_4 에 비해 $T/2$ 만큼 늦게 듀티비 D 로 동작한다. 이 4개 스위칭 소자의 듀티비 D 를 조정함으로써 전류나 전압을 제어하여 CC 모드나 CV 모드 동작을 달성한다. Q_3 및 Q_6 은 S_2 및 S_3 과 그리고 Q_4 및 Q_5 는 S_1 및 S_4 와 상보동작을 한다. Q_1 , Q_2 , Q_7 및 Q_8 은 충전시에는 OFF 상태를 유지한다.

충전시 모드별 회로 동작은 그림 5와 같다.

충전모드 1에서는 그림 5 (a)와 같은 경로가 형성되어 에너지가 전원 V_s 로부터 전지 V_B 로 전달된다. 이때 인덕터 L 도 에너지를 공급받으므로 그림 4와 같이 i_L 이 증가한다.

충전모드 2에서는 그림 5 (b)와 같은 환류 경로가 형성되며, 앞서 인덕터 L 에 저장된 에너지에 의해 전지가 계속 충전된다. 따라서 i_L 은 감소한다.

충전모드 3에서는 그림 5 (c)와 같은 경로가 형성되어 V_s 의 에너지가 전지를 충전한다. 변압기의 2차전압 극성이 반대인 것 외에는 동작이 충전모드 1과 동일하다.

충전모드 4는 충전모드 2의 동작과 동일하며, 인덕터 L 에 저장되었던 에너지로 전지를 충전하는 환류구간이다.

3.3 방전동작 해석

방전하는 경우에도 충전시와 유사하게 방전하한전압에 도달할 때까지는 CC 모드로 방전하고 그 이후에는 CV 모드로 방전한다. 리튬이온전지의 경우 방전하한전압은 활성화 공정에서는 2.7V이고 성능 및 수명 시험의 경우에는 0V의 전압이 된다.

제안한 충방전기의 방전시 게이트 파형 및 인덕터 L 의 전류파형은 그림 6과 같으며, 4개의 모드로 동작한다.

그림 6과 같이 방전시에도 충전시와 마찬가지로 S_1 과 S_4 가 듀티비 D 로 동작하고 S_2 와 S_3 은 S_1 과 S_4 에 비해 $T/2$ 만큼 늦게 듀티비 D 로 동작한다. 방전시에도 $S_1 \sim S_4$ 의 듀티비 D 를 조정하여 CC 모드나 CV 모드 동작을 달성한다. Q_1 및 Q_8 은 S_2 및 S_3 과 그리고 Q_2

영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기

및 Q_7 은 s_1 및 s_4 와 게이트 OFF 시점이 동기되어 동작하며, 0.5의 고정듀티비로 동작한다. $Q_3 \sim Q_6$ 은 방전 시에는 OFF 상태를 유지한다.

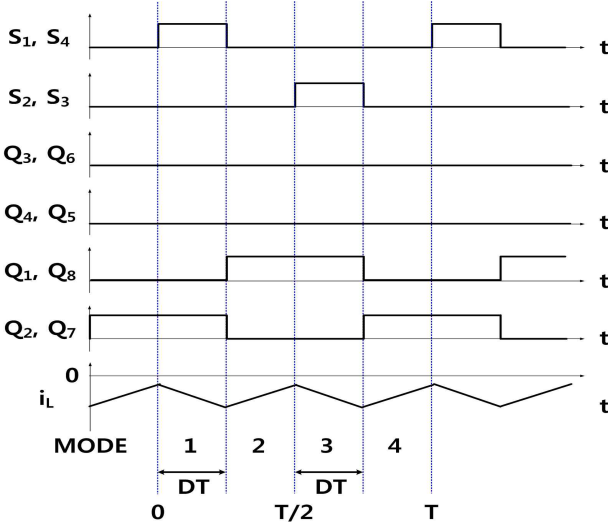


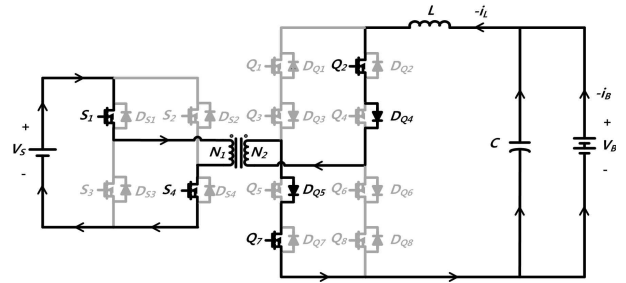
그림 6. 방전시 게이트 파형
Fig. 6. Gate signals in discharging process

방전시 모드별 회로 동작은 그림 7과 같다.

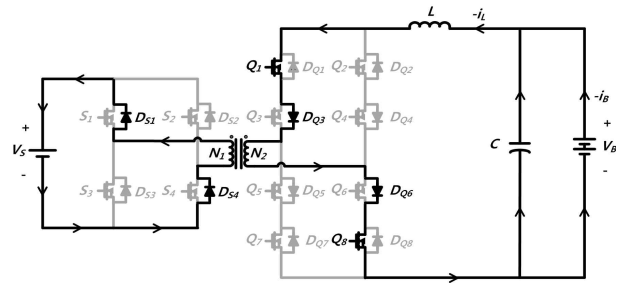
방전모드 1에서는 그림 7 (a)와 같은 경로가 형성되어 전원 V_s 로부터 변압기 2차측에 유기된 전압(위가 (+))과 V_B 의 방전 에너지에 의해 인덕터 L 에 에너지가 저장되며 인덕터 L 의 전류는 그림 6에서처럼 음(-)의 방향으로 증가하게 된다. 이 모드에서 Q_3 이 없다면 $N_2 \rightarrow (Q_3) \rightarrow D_{Q1} \rightarrow Q_2 \rightarrow D_{Q4} \rightarrow N_2$ 의 경로가 형성되어 변압기 2차측이 단락되고 Q_6 이 없다면 $N_2 \rightarrow D_{Q5} \rightarrow Q_7 \rightarrow D_{Q8} \rightarrow (Q_6) \rightarrow N_2$ 의 경로로 인하여 변압기 2차측이 단락된다. 이와 같이 Q_3 및 Q_6 은 방전모드 1에서 회로 단락을 방지하는 역할을 한다.

방전모드 2에서는 그림 7 (b)와 같은 경로가 형성되어 앞서 인덕터 L 에 저장된 에너지와 전지의 방전 에너지가 전원으로 전달된다.

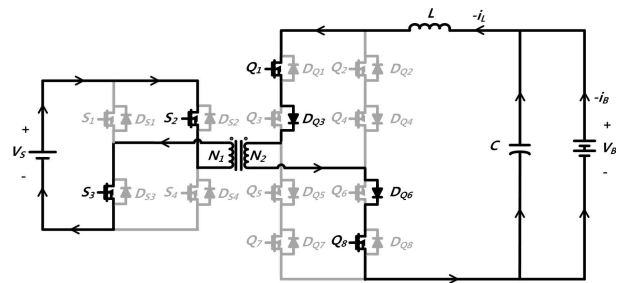
방전모드 3에서는 그림 7 (c)와 같은 경로가 형성되어 변압기 2차측에 유기된 전압(아래가 (+))과 V_B 의 방전 에너지에 의해 인덕터 L 에 에너지가 저장된다. 변압기의 2차전압 극성이 반대인 것 외에는 동작이 방전모드 1과 유사하다. 방전모드 3에서도 방전모드 1과



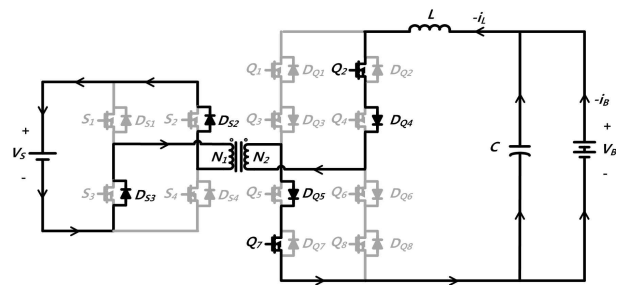
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

그림 7. 방전시 모드별 동작
Fig. 7. Mode operations in discharging process

유사하게 Q_4 및 Q_5 가 있으므로 인하여 $N_2 \rightarrow (Q_4) \rightarrow$

$D_{Q2} \rightarrow Q_1 \rightarrow D_{Q3} \rightarrow N_2$ 및 $N_2 \rightarrow D_{Q6} \rightarrow Q_8 \rightarrow D_{Q7} \rightarrow (Q_5) \rightarrow N_2$ 의 경로를 통한 회로단락을 방지할 수 있다.

방전모드 4에서는 그림 7 (d)와 같은 경로가 형성되어 인덕터 L 에 저장된 에너지와 전지 V_B 의 방전 에너지를 전원 V_S 로 전달하는 회수동작을 하며, 변압기의 2차전압 극성이 반대인 것 외에는 동작이 방전모드 2와 유사하다.

4. 영전압 방전의 구현

영전압 방전이란 2차전지의 전압이 0V에 도달할 때까지 설정 전류값을 유지하면서 방전하는 것이다. 하지만 스위칭 소자에서의 전압강하와 긴 부하배선에서의 전압강하로 인해 전지의 전압이 이러한 전압강하분보다 낮아지면 방전이 중단되어 영전압까지 방전할 수 없게 된다.

스위칭 충방전기에서 영전압 방전을 구현하기 위해서는 전지의 전압이 낮은 영역에서도 부스트 인덕터의 전류 상승구간동안 승압에 필요한 충분한 전압이 인덕터 양단에 인가되어야 한다.

4.1 기존 스위칭 충방전기의 한계

기존의 스위칭 방식 충방전기 중에서 풀브리지 변환기형을 예로 하여 기존 충방전기의 한계를 알아본다. 그림 8은 기존의 풀브리지형 스위칭 충방전기에서 부스트 구간에서의 회로동작 및 변압기 2차 측 등가회로를 나타낸 것이다.

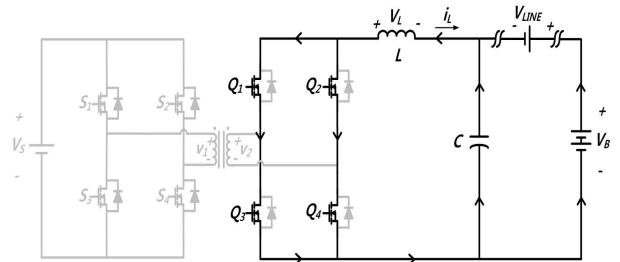
그림 8 (a)에서 스위치의 순방향 전압강하를 V_Q , 부하배선의 전압강하를 V_{LINE} 이라고 하고 변압기 2차 측의 등가회로를 구하면 그림 8 (b)와 같다.

그림 8 (b)에서 부스트 인덕터 L 양단의 전압은 다음과 같다.

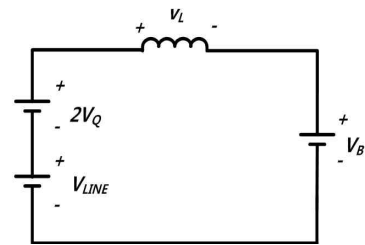
$$v_L = -V_B + 2V_Q + V_{LINE} \quad (1)$$

식 (1)에서 인덕터 L 양단에 걸리는 전압은 전지의 전압 V_B 와 스위칭 소자 및 부하배선에서의 전압강하

$2V_Q + V_{LINE}$ 의 차이임을 알 수 있다. 따라서 기존의 스위칭 충방전기는 부스트 구간에서 전지의 전압 V_B 가 전압강하의 합인 $2V_Q + V_{LINE}$ 보다 낮은 영역에서는 인덕터 L 양단에 승압에 필요한 충분한 전압이 걸리지 못하므로 방전동작이 불가능해진다.



(a) 부스트 구간에서의 회로 동작



(b) 등가회로

그림 8. 풀브리지 변환기형 충방전기의 방전
Fig. 8. Discharge of full-bridge type charger/discharger

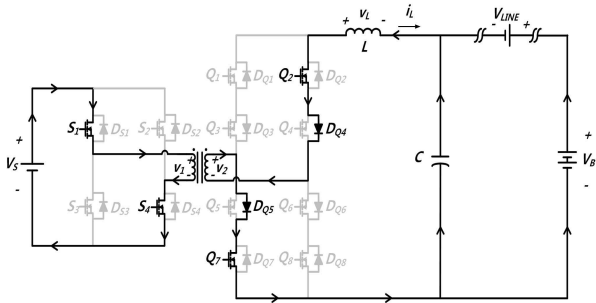
4.2 제안한 충방전기의 영전압 방전 구현

제안한 충방전기의 방전시 인덕터 L 에 에너지를 저장하는 부스트 구간에서의 회로동작 및 변압기 2차 측 등가회로는 그림 9와 같다.

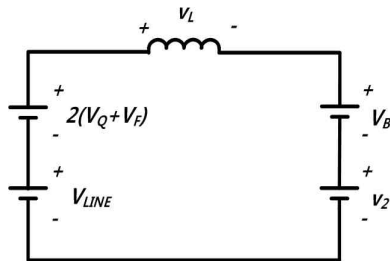
그림 9 (a)에서 스위치의 순방향 전압강하를 V_Q , 다이오드 순방향 전압강하를 V_F , 부하배선의 전압강하를 V_{LINE} 이라고 하고 등가회로를 구하면 그림 9 (b)와 같다.

그림 9 (b)에서 부스트 인덕터 L 양단의 전압은 다음과 같다.

$$v_L = -V_B - v_2 + 2(V_Q + V_F) + V_{LINE} \quad (2)$$



(a) 부스트 구간에서의 회로 동작



(b) 등가회로

그림 9. 제안한 충전장치의 방전
Fig. 9. Discharge of proposed charger/discharger

식 (2)에서 인덕터 L 양단에 걸리는 전압 v_L 은 전지의 전압과 변압기 2차 측 전압의 합인 $V_B + v_2$ 와 소자 및 부하배선에서의 전압강하 $2(V_Q + V_F) + V_{LINE}$ 의 차이임을 알 수 있다. 여기서 v_2 는 입력전압 V_s 에 의해 변압기 2차 측으로 유기된 전압으로서 그 값은 다음과 같다.

$$v_2 = (N_2/N_1) \cdot V_s \quad (3)$$

식 (3)에서 v_2 는 변압기 권수비와 입력전압 V_s 에 의해 결정되는 값으로서 그 크기는 소자의 전압강하 및 부하배선에서의 전압강하 값보다 충분히 크게 할 수 있다.

$$v_2 \gg 2(V_Q + V_F) + V_{LINE} \quad (4)$$

따라서 제안한 충전장치에서는 전지의 전압이 낮은 구간에서도 방전이 가능하여 영전압 방전 구현이 가능해진다.

5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 영전압 방전이 가능한 스위칭 충전장치의 유효성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 툴은 Ansoft사의 Simplorer 6.0이며, 2차전지를 R-C 직렬회로로 등가화하였다[4-5].

시뮬레이션에 사용한 충전시의 등가 커패시턴스 C_{ch} 는 그림 17 (b)와 같은 충전시험을 시행하여 구하였다. V_B 가 2.2V로부터 50A CC 모드로 충전되어 충전상한전압인 4.2V에 도달할 때까지의 시간은 측정결과 1,550sec이며 전류 I_B 를 적분하면 전하량 ΔQ 를 구할 수 있으므로 충전시의 커패시턴스 C_{ch} 의 값은 다음과 같다.

$$C_{ch} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{50 \times 1550}{4.2 - 2.2} = 38750[F] \quad (5)$$

방전시의 등가 커패시턴스 C_{dch} 도 그림 18 (b)와 같은 방전시험을 시행하여 구하였는데, V_B 가 50A CC 모드로 방전하여 0V에 도달할 때까지의 시간은 측정결과 1,865sec이다. 충전시와 동일한 방법으로 방전시의 커패시턴스 C_{dch} 의 값을 구하면 다음과 같다.

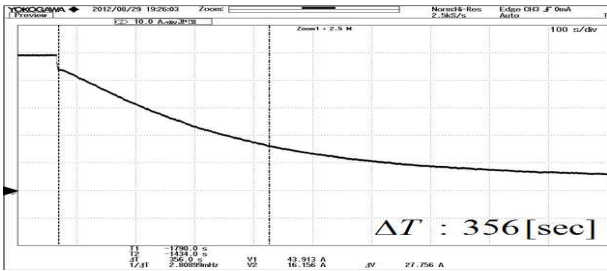
$$C_{dch} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{50 \times 1865}{4.2} = 22202[F] \quad (6)$$

시뮬레이션에 사용한 2차전지의 내부 등가저항을 구하기 위하여 실험과형인 그림 10을 이용하였다. 이 그림의 CV 구간에서 전류 I_B 가 감소하는데, 전류의 값이 초기값의 36.8%되는 지점까지 도달하는 시간이 시정수이다. R-C 직렬회로에서 $\tau = RC$ 이므로 $R = \tau/C$ 에 위에서 구한 등가 커패시턴스를 대입하면 내부 등가저항을 구할 수 있다. 그림 10 (a)에서 충전시의 시정수 τ_{ch} 가 356sec이며, 따라서 충전시의 등가저항은 R_{ch} 의 값은 다음과 같다.

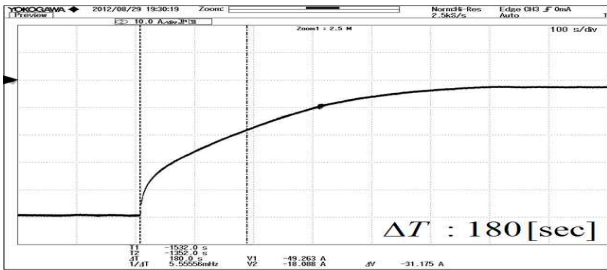
$$R_{ch} = \frac{\tau_{ch}}{C_{ch}} = \frac{356}{38750} = 9.19[m\Omega] \quad (7)$$

그림 10 (b)에서 방전시의 시정수 τ_{dch} 는 180sec이므로 방전시의 등가저항 R_{dch} 는 다음과 같다.

$$R_{dch} = \frac{\tau_{dch}}{C_{dch}} = \frac{180}{22202} = 8.1[m\Omega] \quad (8)$$



(a) CV 구간 충전전류



Horizontal : 80sec/div. Vertical : 20A/div

(b) CV 구간 방전전류

그림 10. CV 구간에서의 전류
Fig. 10. Currents in CV region

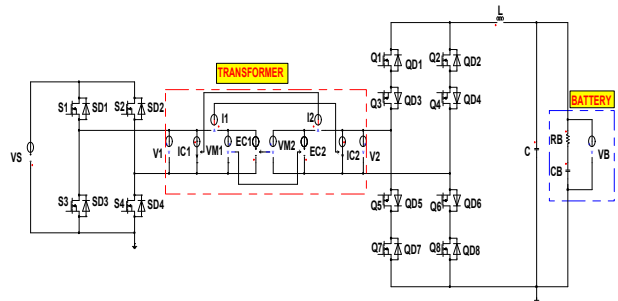
충전시 Q_3 및 Q_6 의 게이트 파형은 이론상 그림 4와 같이 충전모드 3에서 게이트 전압이 인가되지 않는다. 그런데 그림 5 (c)의 경로를 살펴보면 충전모드 3에서 Q_3 및 Q_6 에 게이트 전압이 인가되어도 두 소자와 직렬로 접속되어 있는 Q_1 및 Q_8 이 OFF 상태이고 D_{Q1} 및 D_{Q8} 도 역방향이므로 회로 동작에는 변함이 없다. 본 논문에서는 제어의 편의성을 위하여 충전모드 3에서도 Q_3 및 Q_6 에 게이트 전압을 인가하기로 한다. Q_4 및 Q_5 의 경우에도 Q_3 및 Q_6 의 경우와 마찬가지로 충전모드 1에서 게이트 전압을 인가하여도 회로동작에 변함이 없으므로 충전모드 1에서도 Q_4 및 Q_5 에 게이트 전압을 인가하기로 한다. 이와 같이 하면 Q_3 및 Q_6 은 모드 3에서, 그리고 Q_4 및 Q_5 는 모드 1에서 각각

게이트 구동회로의 손실이 약간 더 발생하지만 전력 회로가 아니라 신호회로이므로 추가로 발생하는 손실이 미미하다. 반면에 이와 같이 하면 구동회로를 구성할 때 $Q_3 \sim Q_6$ 에 동일한 신호를 공통으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

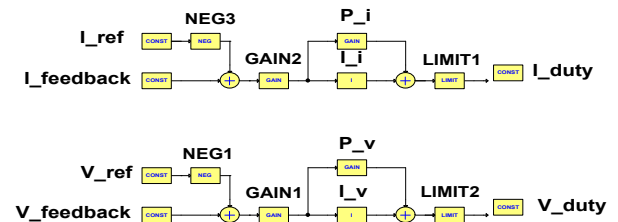
시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 2와 같으며, 제안한 충방전기의 시뮬레이션 회로도 및 제어 회로도 는 그림 11과 같다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Values	Parameter	Values
입력전압 (V_S)	24V	스위칭 주파수 (f_s)	50kHz
인덕터 (L)	80uH	커패시터 (C)	13.2mF
C_{ch}	38,750F	R_{ch}	9.19mΩ
C_{dch}	22,202F	R_{dch}	8.1mΩ



(a) 메인회로 구성



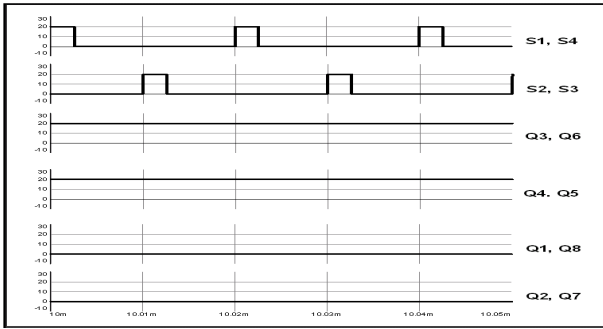
(b) 전압 및 전류 제어기

그림 11. 시뮬레이션 회로도
Fig. 11. Simulation circuit diagram

충전 시뮬레이션 결과는 그림 12와 같다. 그림 12 (a)는 정상상태에서 듀티비 $D=0.13$ 일 때의 능동 스위

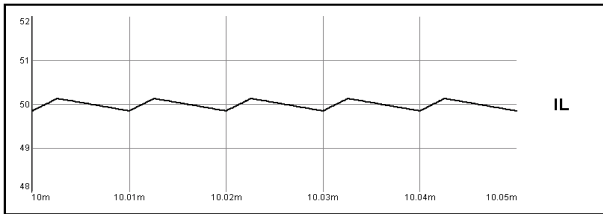
영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기

치에 인가되는 게이트 파형이다. 그림 12 (b)는 인덕터 전류파형이며, 그림 12 (c)는 입력전류 파형이다. 그림 12 (c)에서 i_S 의 값이 양(+)이므로 충전시 에너지는 전원 V_S 에서 2차전지 V_B 로 전달됨을 알 수 있다.



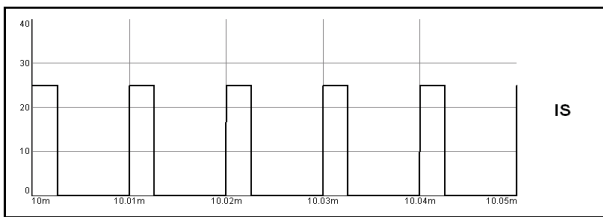
Horizontal : 10usec/div. Vertical : 10V/div.

(a) 게이트 파형



Horizontal : 10usec/div. Vertical : 1A/div.

(b) 인덕터 전류 i_L



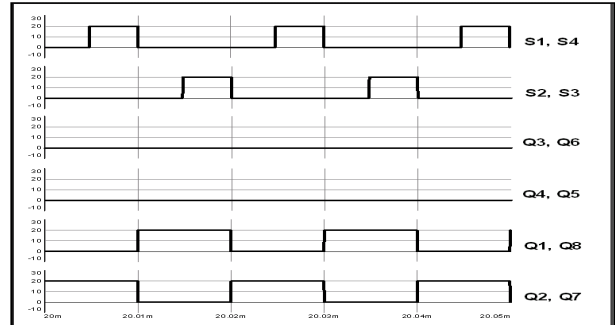
Horizontal : 10usec/div. Vertical : 10A/div.

(c) 입력전류 i_S

그림 12. 충전 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Simulation results in charging process

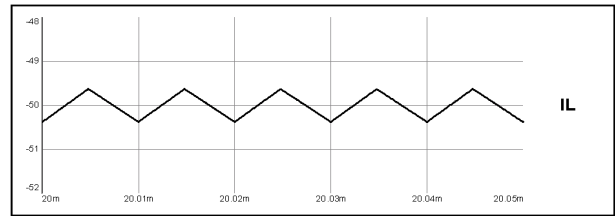
그림 13은 방전 시뮬레이션 결과이다. 그림 13 (a)는 정상상태에서 듀티비 $D=0.24$ 일 때의 능동 스위치에 인가되는 게이트 파형이다. 그림 13 (b)는 인덕터 전류

파형이며, 그림 13 (c)는 입력전류 파형이다.



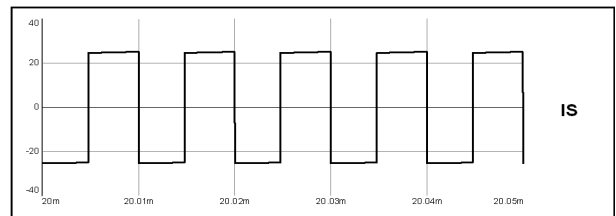
Horizontal : 10usec/div. Vertical : 10V/div.

(a) 게이트 파형



Horizontal : 10usec/div. Vertical : 1A/div.

(b) 인덕터 전류 i_L



Horizontal : 10usec/div. Vertical : 10A/div.

(c) 입력전류 i_S

그림 13. 방전 시뮬레이션 결과
Fig. 13. Simulation results in discharging process

본 논문에서 제안한 충방전기의 영전압 방전 구현은 인덕터 L 에 에너지를 저장하는 부스트 구간에서 전원 V_S 에 의해 에너지가 공급됨으로써 가능하다. 그림 13 (c)에서 i_S 의 값이 양(+)인 영역이 전원 V_S 에 의해 공급된 에너지가 인덕터 L 에 저장되는 부스트 구간이 되며, i_S 의 값이 음(-)인 영역은 2차전지 V_B 의 방전 에

너지와 인덕터 L 에 저장되었던 에너지가 입력전원 V_s 로 에너지가 전달되는 회수 구간이다.

실제 2차전지의 충방전에 소요되는 시간을 감안하여 상태공간평균화법[4]을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 14는 상태공간평균화법을 이용한 시뮬레이션 구성도이고, 그림 15는 상태공간평균화법을 이용한 시뮬레이션 결과이다.

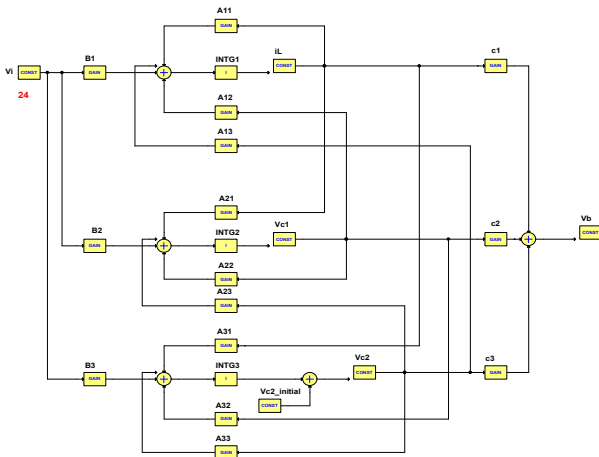
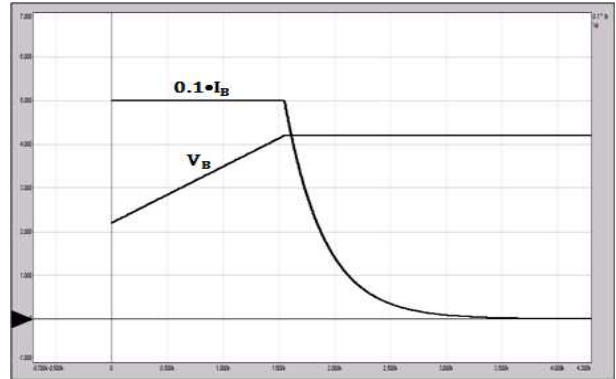


그림 14. 상태공간평균화법을 이용한 시뮬레이션 회로도
Fig. 14. Simulation circuit diagram using state space averaging method

그림 15 (a)는 충전 시뮬레이션 결과로서 전지의 전압이 4.2V에 도달하기 이전에는 50A CC 모드로 배터리를 충전하여 2차전지의 전압이 서서히 상승하며, 전지의 전압이 4.2V에 도달한 이후에는 CV 모드로 동작하여 전지의 전압을 4.2V로 일정하게 유지되면서 전류가 서서히 감소한다.

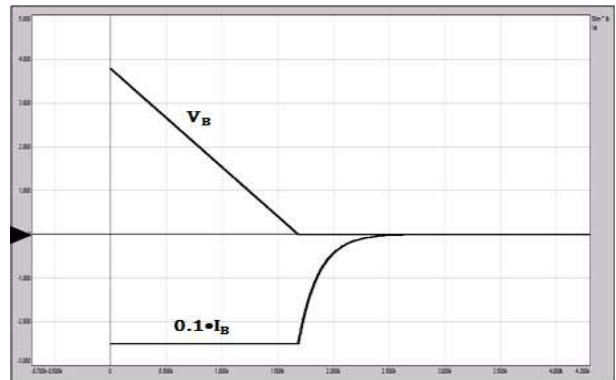
그림 15 (b)는 방전 시뮬레이션 결과로서 전지의 전압이 0V에 도달할 때까지 50A CC 모드로 방전하여 2차전지의 전압이 서서히 하강하며, 0V에 도달한 이후에는 CV 모드로 동작하여 전지의 전압이 0V를 유지하면서 전류의 크기가 서서히 감소한다.

상태공간평균화법을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안한 충방전기가 충전과 방전 동작을 정상적으로 수행하며, 특히 방전 결과에서 2차전지의 전압이 낮은 영역에서도 방전동작이 정상적으로 수행되어 0V까지 방전됨을 확인하였다.



V : Horizontal : 500sec/div. Vertical : 1V/div.
I : Horizontal : 500sec/div. Vertical : 10A/div.

(a) 충전 시뮬레이션 결과



V : Horizontal : 500sec/div. Vertical : 1V/div.
I : Horizontal : 500sec/div. Vertical : 20A/div.

(b) 방전 시뮬레이션 결과

그림 15. 상태공간평균화법을 이용한 시뮬레이션 결과
Fig. 15. Simulation results using state space averaging method

6. 실험결과 및 검토

제안한 충방전기의 타당성을 입증하기 위하여 충방전기를 설계 및 제작하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 파라미터는 표 2의 시뮬레이션 조건과 동일하며, 40AH 용량의 리튬폴리머 전지를 사용하였다. 실험에 사용한 전지의 상세 규격은 표 3과 같다.

실제 2차전지 충전시스템에서는 3상 220V의 교류를 입력으로 하는 PWM Converter의 가변 직류출력전압을 공통전원으로 사용하는데 2,600mAh인 2차전지의

영전압 방전이 가능한 새로운 방식의 2차전지 충방전기

경우에는 공통전원에 1,024개의 충전기가 접속되기도 한다. 본 논문에서는 충방전기의 입력 직류전압으로 24V를 사용하였다. 실험장치는 그림 16과 같으며 충전 및 방전 실험결과는 각각 그림 17 및 그림 18과 같다.

표 3. 2차전지 사양
Table 3. Specifications of secondary battery

종 류	리튬폴리머
용 량	40AH
정규 전압	3.65V
최대 충전전압	4.15V
방전 하한전압	2.5V
교류 임피던스(@ 1kHz)	<3.0mΩ

그림 16에서 실험장치는 충방전기 모듈, 게이트 구동 드라이버 보드, 제어 보드 및 테스트 보드로 구성된다. 제어용 IC로 MC56F8247을 사용하였고, 각 스위치의 게이트 신호를 절연하기 위하여 포토커플러 TLP351과 절연형 DC-DC Converter를 사용하였다. 또한 메인회로의 스위치로는 IRF3205를 사용하였다.

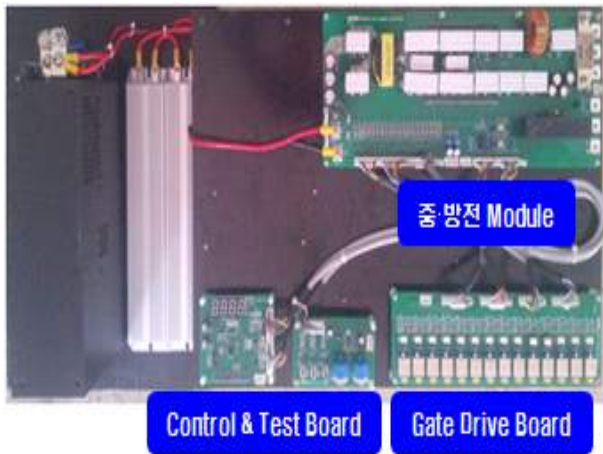
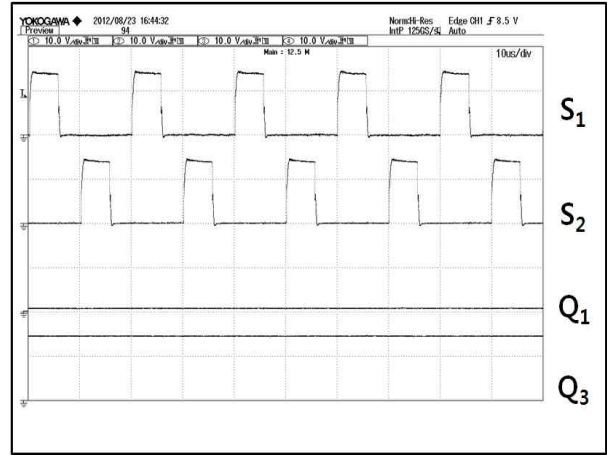


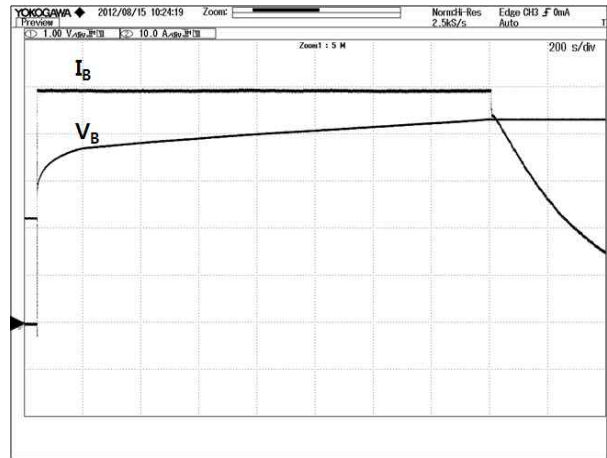
그림 16. 실험장치
Fig. 16. Experimental setup

그림 17 (a)는 충전시의 게이트 파형이며, 변압기 1차 측 스위치 $S_1 \sim S_4$ 의 동작에 의해 충전동작이 수



V : Horizontal : 10usec/div. Vertical : 10V/div.

(a) 게이트 파형

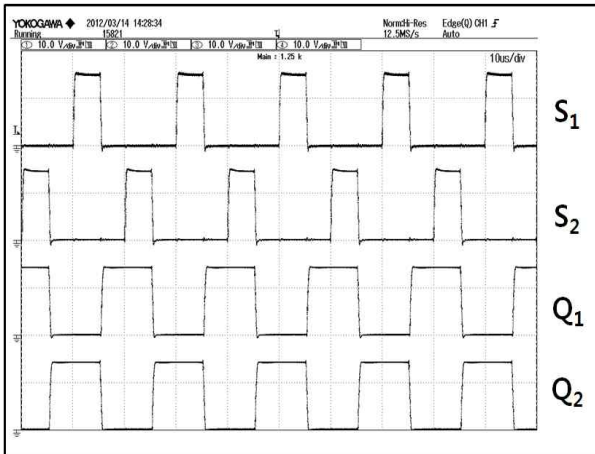


V : Horizontal : 200sec/div. Vertical : 1V/div.
I : Horizontal : 200sec/div. Vertical : 10A/div.

(b) 전지의 전압 및 전류 파형

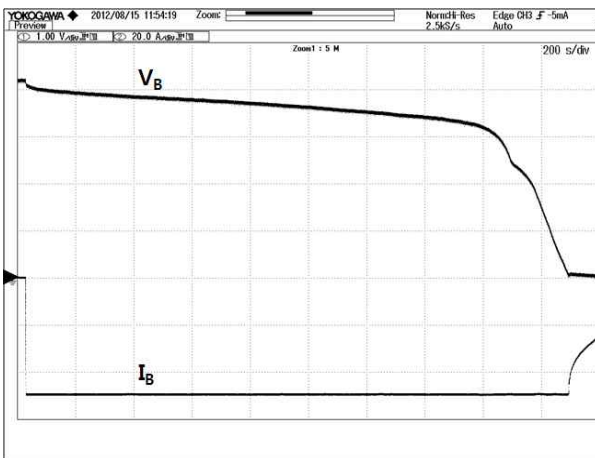
그림 17. 충전 실험 결과
Fig. 17. Experimental results in charging process

행된다. 그림 17 (b)는 2차전지의 전압 및 전류 파형으로서 제안한 충방전기가 2차전지의 전압이 4.2V에 도달하기 이전에는 50A의 일정전류로 2차전지를 충전한다. 2차전지의 전압이 4.2V에 도달한 이후에는 CV 모드로 절환되어 2차전지의 전압을 4.2V로 일정하게 유지하며 계속해서 충전됨을 확인할 수 있다. 이때 충



V : Horizontal : 10µsec/div. Vertical : 10V/div.

(a) 게이트 파형



V : Horizontal : 200sec/div. Vertical : 1V/div.
I : Horizontal : 200sec/div. Vertical : 20A/div.

(b) 전지의 전압 및 전류 파형

그림 18. 방전 실험 결과

Fig. 18. Experimental results in discharging process

전전류는 서서히 감소한다.

그림 18 (a)는 방전 게이트 파형이며, 변압기 1차 측 스위치 $s_1 \sim s_4$ 와 2차 측 스위치 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 에 의해 방전동작이 수행된다. 그림 18 (b)는 전지의 전압 및 전류 파형으로서 전지전압이 0V에 도달하기 이전에는 50A로 2차전지를 방전한다. 그리고 2차전지의 전

압이 0V에 도달한 이후에는 CV 모드로 절환되어 2차 전지의 전압을 0V로 일정하게 유지하며 계속해서 방전함을 확인할 수 있다. 이때 방전전류의 크기는 서서히 감소한다.

실험결과 제안한 충방전기는 전지의 전압이 낮은 영역에서도 스위칭 소자 및 부하배선의 전압강하 값에 관계없이 전지의 전압이 0V에 도달할 때까지 전지를 방전시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 2차전지를 하나의 시스템으로 충방전시킬 수 있고 방전시에는 전지를 영전압까지 방전시킬 수 있는 새로운 스위칭 방식의 충방전기를 제안하였다. 기존의 스위칭 방식 충방전기는 방전하한 전압까지만 방전이 가능하고 영전압방전이 불가능하다. 또한 현재 영전압까지 방전이 가능한 리니어 방식 충방전기는 효율이 낮고 별도의 전원장치가 필요하며 방전 에너지를 회수할 수 없다는 단점이 있다.

제안한 충방전기는 전지의 전압이 낮은 영역에서도 스위칭 소자 및 긴 부하배선에서의 전압강하 성분에 제한받지 않고 전지를 0V까지 설정전류를 유지하면서 방전할 수 있으며 별도의 전원장치가 필요없다. 제안한 충방전기를 구성하고 충방전 동작을 해석하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 확인하였다.

제안한 충방전기는 전지의 전압 및 전압강하 성분들에 의해 제약받지 않고 구동이 가능하여 넓은 전압범위에서 사용이 가능하므로 모든 2차전지에 적용 가능한 높은 활용성을 확보하였다.

References

- [1] Majid Delshad and M. Mahdavi, "A New Zero Voltage Switching Buck-Boost Bidirectional DC-DC Converter," Proceedings of 2010 International Conference on Applied Electronics, pp.1-9, Sept. 2010.
- [2] Yung-Chu Chen, Jeng-Gung Yang, and Chia-Ling Kuo, "Isolated Bidirectional Full-Bridge DC-DC Converter with a Flyback Snubber", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 7, pp.1915~1922, July 2010.

- [3] Cang-Youl Jeong, "Improved Phase-Shift Pulse-Width Modulation Full-bridge Converter Using a Blocking Capacitor", Journal of KIIE, vol. 25, no. 8, pp.20~29, Aug. 2011.
- [4] Sang-Hwa Jung, Young-Jin Woo, Nam-In Kim, and Gyu-Hyeong Cho, "Analog-Digital Switching Mixed Mode Low Ripple-High Efficiency Li-Ion Battery Charger", IEEE ISIE Proceedings, pp.2473~2480, 2001.
- [5] Hwa-Young Won, Soo-Yong Chae, and Soon-Chan Hong, "State Space Averaging Based Analysis of the Lithium Battery Charge/Discharge System", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 14, no. 5, pp.387~396, Oct. 2009.

◇ 저자소개 ◇



정대택 (鄭大澤)

1969년 1월 3일생. 1992~2004년 (주)엘리코파워 연구소장. 2001년 숭실대 정보통신전자공학부 졸업. 2003년 한양대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 단국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



채수용 (蔡洙龍)

1979년 1월 5일생. 2005년 단국대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



홍순찬 (洪淳瓚)

1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학실 전임강사. 1978년~현재 단국대 전자전기공학부 교수. 1986~1987년 미국 텍사스 A&M 대학교 방문교수. 1997~2000년 대한전기학회 이사. 2002년 전력전자학회 회장. 2002년~2005년 단국대 공과대학 학장.