

이차전지 충방전용 직류-직류 변환기에 관한 연구

채수용*, 서영민*, 정대택*, 윤덕용**, 홍순찬*
 *단국대학교, **공주대학교

A Study on the DC-DC Converter to Charge and Discharge Secondary Batteries

Soo-Yong Chae*, Young-Min Seo*, Dae-Taek Chung*, Duck-Yong Yoon**, Soon-Chan Hong*
 *Dankook University, **Kongju National University

Abstract - This paper proposes a DC-DC converter which is able to charge and discharge secondary batteries. The converter operates as a double-ended forward converter in charging process and as electrical isolated boost converter in discharging process. The converter is designed for continuous current operation. The switching frequency is selected as 100kHz to reduce the size of both the inductor and the capacitor.

1. 서 론

최근 수요가 증가하고 있는 이차전지는 용량에 한계가 있어 사용에 제약이 있었지만, 전지 기술의 발달로 현재는 대용량, 소형화 되는 추세이다. 이차전지는 충전시에 일정전압까지는 CC(Constant Current)모드로 충전하고 일정전압에 도달한 후에는 CV(Constant Voltage)모드로 충전을 하며, 방전시에는 CC모드로 방전하한전압까지 방전하게 된다.^[2]

변환기 설계를 위해 이차전지는 5V, 2800mAh급의 리튬 폴리머 전지를 0.5C로 충방전하는 것을 기준으로 하고 충전상한전압은 4.2V, 방전하한전압은 2.7V로 하며, 충전모드에서의 정밀도는 0.1%로 한다. 또한 스위칭 주파수는 100kHz로 한다.^[3]

본 논문에서는 단일 장치로 충전과 방전을 모두 할 수 있는 직류-직류 변환기를 구성하고 그 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다.

2. 회로 해석

본 연구에서 제시한 충방전기는 충전시에는 양단 포워드 변환기로 동작하고 방전시에는 절연된 부스트 변환기로 동작한다. 본 장에서는 양단 포워드 변환기와 절연된 부스트 변환기의 특성을 살펴본다.

2.1 충전회로

그림 1은 충전회로로 채택한 양단포워드 변환기의 회로도이다. 양단포워드 변환기를 선택한 것은 꺼져있는 스위치에 걸리는 전압이 포워드 변환기의 절반 수준이므로 대용량화가 가능하기 때문이다.

그림 1에서 스위치 Q1과 Q2는 일정한 듀티비로 동시에 켜지고 꺼진다. 두 스위치가 켜지면 부하단으로 에너지가 전달된다. 스위치 Q1, Q2가 꺼지면 변압기 1차측은 Lm에 저장된 에너지가 다이오드 D3과 D4를 통해 전원으로 회수되면서 변압기를 리셋시키고, 변압기 2차측은 Lf와 Cf에 의해 부하로 에너지를 전달하게 된다.^[1]

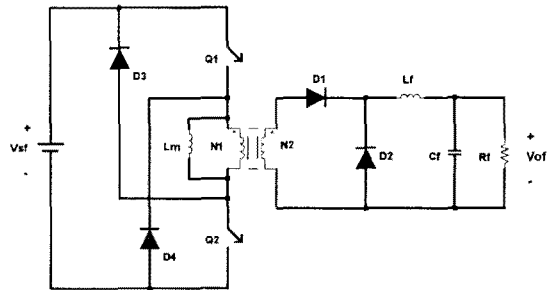


그림 1. 양단 포워드 변환기
 Fig. 1. Double-ended forward converter.

Q1 및 Q2의 듀티비를 Df라 하고 변압기의 권수비를 N1/N2=a라 하면 출력전압 Vof는 식 (1)과 같다.

$$V_{of} = V_{sf} D_f / a \tag{1}$$

스위치가 켜져있을 때 자화인덕턴스 Lm에 흐르는 전류의 상승 기울기는 식 (2)와 같고 스위치가 꺼져있을 때 Lm 전류의 하강 기울기는 식 (3)과 같다.

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{D_f T} = \frac{V_{sf}}{L_m} \tag{2}$$

T : 스위칭 주기

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = -\frac{V_{sf}}{L_m} \tag{3}$$

Δt : Lm의 전류가 하강하여 0으로 되는데 걸리는 시간

식 (2)와 식 (3)을 보면 자화인덕턴스 Lm에서 전류의 상승 기울기와 하강 기울기의 크기가 같음을 알 수 있다. 따라서 한 주기내에 변압기 코어를 초기 상태로 리셋시키기 위해서는 Df가 0.5보다 작은 값이어야 한다.

식 (1)에서 Df의 최대값이 0.5이므로 변압기 권수비의 최대값은 다음과 같다.

$$a_{max} = \frac{V_{sf}}{2V_{of}} \tag{4}$$

식 (4)에서 Vsf=311[V], Vof=4.2[V]인 경우, 변압기 권수비의 최대값은 37.1이다.

출력인덕터 Lf에 흐르는 평균전류는 저항부하에 흐르

는 평균전류와 같은 값이므로 식 (5)와 같으며 스위치가 꺼져있을 때 전류의 하강분은 식 (6)과 같다.

$$I_{L_f} = \frac{V_{of}}{R_f} \quad (5)$$

$$(\Delta i_{L_f})_{open} = -\frac{V_{of}(1-D_f)T}{L_f} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서 인덕터 전류의 최소값을 구하면 식 (7)과 같다.

$$(i_{L_f})_{min} = I_{L_f} - \frac{|\Delta i_{L_f}|}{2} = \frac{V_{of}}{R_f} - \frac{V_{of}(1-D_f)T}{2L_f} \quad (7)$$

L_f 에 흐르는 전류가 연속이기 위해서는 식 (7)에서 $(i_{L_f})_{min} \geq 0$ 이어야 하므로 식 (8)이 성립한다.

$$L_f \geq \frac{R_f(1-D_f)T}{2} = \frac{R_f(1-D_f)}{2f} \quad (8)$$

또한 출력전압의 정밀도를 K_1 이라 하면 식 (9)가 성립한다.

$$\frac{\Delta V_{of}}{V_{of}} = \frac{1-D_f}{8L_f C_f f^2} \leq K_1 \quad (9)$$

따라서 출력 커패시터 C_f 값의 범위는 식 (10)과 같다.

$$C_f \geq \frac{1-D_f}{8L_f K_1 f^2} \quad (10)$$

2. 방전회로

그림 2는 방전회로로 채택한 절연된 부스트 변환기의 회로도이다. 그림 2에서 변압기 2차측에 직류전원을 두 있는데 이는 방전시의 이차전지를 대체한 것이다.

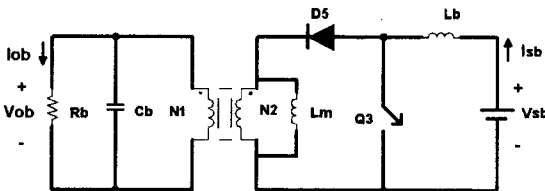


그림 2. 절연된 부스트 변환기
Fig. 2. An electrical isolated boost converter.

그림 2에서 스위치 Q_3 가 켜지면 Q_3 를 통해 폐회로가 구성되며, L_b 의 전류는 상승한다. 일정시간후 Q_3 가 꺼지면 다이오드 D_5 와 변압기 2차측 권선을 통해 에너지를 1차측 부하로 전달한다.^[1]

Q_3 의 듀티비를 D_b 라 하면 절연된 부스트 변환기의 입력 출력 관계는 식 (11)과 같다.

$$V_{ob} = \frac{aV_{sb}}{1-D_b} \quad (11)$$

식 (11)의 입력 출력 관계식에서 변압기 권수비의 범위를 구하면 식 (12)와 같다.

$$(1-D_{max})\frac{V_{ob}}{V_{sb}} \leq a \leq (1-D_{min})\frac{V_{ob}}{V_{sb}} \quad (12)$$

부스트 변환기에서 이론적으로는 $0 < D_b < 1$ 이지만 실제로는 $0.2 \leq D_b \leq 0.8$ 범위를 사용한다. 또한 부스트 변환기에서도 변압기의 리셋을 고려하면 $D_{min}=0.5$ 이다. 따라서 $V_{sb}=4.2[V]$, $V_{ob}=350[V]$ 인 경우, 변압기 권수비의 범위는 $16.7 \leq a \leq 41.6$ 이 된다.

입력 전력과 출력 전력이 같다는 조건하에 인덕터 L_b 의 평균전류를 계산하면 식 (13)과 같으며, L_b 에 흐르는 전류의 상승분은 식 (14)와 같다.

$$I_{L_b} = \frac{a^2 V_{sb}}{(1-D_b)^2 R_b} \quad (13)$$

$$(\Delta i_{L_b})_{closed} = \frac{V_{sb} D_b T}{L_b} \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)를 이용해 인덕터 L_b 에 흐르는 전류의 최소값을 구하면 식 (15)와 같다.

$$I_{min} = I_{L_b} - \frac{\Delta i_{L_b}}{2} = \frac{a^2 V_{sb}}{(1-D_b)^2 R_b} - \frac{V_{sb} D_b T}{2L_b} \quad (15)$$

인덕터 전류가 연속이려면 $(L_b)_{min} \geq 0$ 이어야 하므로 인덕터 값의 범위를 구하면 식 (16)과 같다.

$$L_b \geq \frac{D_b(1-D_b)^2 R_b}{2a^2 f} \quad (16)$$

3. 2차전지 충방전회로

지금까지 이차전지의 충전과 방전을 할 수 있는 회로를 개별적으로 살펴 보았다. 이러한 직류-직류 변환기를 실제의 충방전기에 적용하기 위해서는 충전과 방전을 하나의 변환기로 수행할 수 있는 회로가 필요하다.

그림 3은 충전과 방전을 하나의 변환기로 수행하기 위해 그림 1과 그림 2의 회로를 합성한 회로의 구성도이다. 그림 2의 D_5 는 그림 3에서와 같이 Q_5 가 되어야 포워드 변환기 동작시 변압기 2차측의 단락을 막을 수 있다.

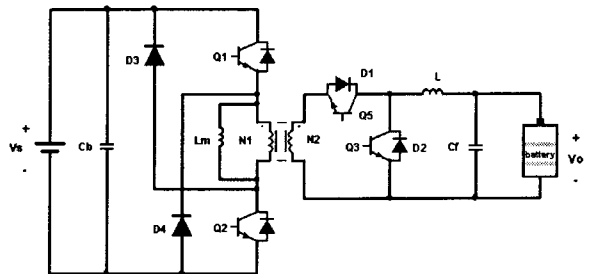


그림 3. 충방전기 구성도
Fig. 3. Construction of charger and discharger.

그림 3에서 충전시에는 스위치 Q_1 , Q_2 가 듀티비 D_f 로 동작하고, 변압기 오른쪽에서는 Q_3 , Q_5 가 동작하지 않음

며 다이오드만 동작하여 양단 포워드 변환기와 같이 동작한다.

방전시에는 스위치 Q_3 는 듀티비 D_b 로 동작하고 스위치 Q_5 는 Q_3 와 반대로 동작하여 부스트 변환기와 같이 동작하게 되며, 변압기 좌측 회로는 스위치 Q_1, Q_2 가 동작하지 않고 다이오드만 동작한다.

여기서 변압기와 인덕터는 충전시와 방전시에 공통으로 사용되므로 그 값을 설계하는데 있어 충분히 고려되어야 하며, 커패시터의 값은 서로 독립적이므로 충전과 방전시의 정밀도에 따라 적절한 값을 정해주면 된다.

4. 시뮬레이션

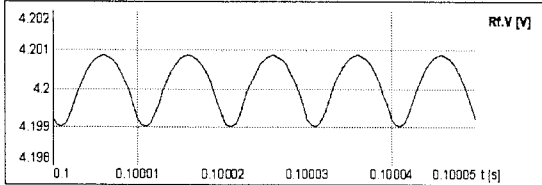
변압기의 권수비는 충전과 방전시의 공통범위에서 선정하여야 한다. 사용 가능한 권수비의 범위는 식 (4) 및 식 (12)와 같으며, 본 연구에서는 $a=20$ 으로 설정하였다. 커패시터의 경우, 커패시턴스의 범위를 만족하는 적절한 용량을 선정하였다.

표 1은 양단 포워드 변환기의 설계값이다. 이론적으로 인덕터 L_f 값은 10.65[uH]이고, 커패시터 C_f 의 값은 456.25[uF]이지만 안정도를 고려하여 여유를 두었다.

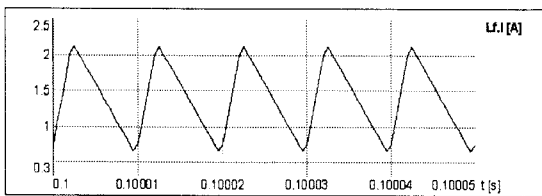
그림 4(a)는 출력전압파형이며, 맥동이 설계조건인 0.1%보다 작은 값을 알 수 있다. 또한 그림 4(b)에서 출력 인덕터의 전류가 연속임을 확인할 수 있다.

표 1. 충전시의 파라미터
Table 1. Parameters in charging process.

V_{sf}	311[V]	L_f	20[uH]
V_{of}	4.2[V]	C_f	1000[uF]
N_1/N_2	20	D_f	0.2701



(a) 출력전압 파형



(b) 출력인덕터 전류파형

그림 4. 충전시의 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation results in charging process.

표 2는 부스트 변환기의 설계값이다. 방전시 출력전압 V_{ob} 를 350[V]로 설정한 것은 변압기 1차측으로 회수된 에너지를 인버터를 통해 전원단으로 회수시 교류률 제어를 수행하기 위해서이다. 인버터를 사용하여 직류전력을 교류모션으로 회수할 때 인버터의 출력전압이 교류모션의 전압보다 높으면 역률 1로 제어할 수 있어서 시스템 효율을 높일 수 있다.^[4]

그림 5는 방전시의 출력전압을 시뮬레이션한 결과로서 충분한 정밀도를 갖는다. 충방전기에서 충전시의 전압정밀도와 전류정밀도는 이차전지의 특성에 영향을 미치므로 아주 중요하다. 그러나 방전시의 전류정밀도는 충전시의 전류정밀도만큼 중요하지는 않다.

표 2. 방전시의 파라미터

Table 2. Parameters in discharging process.

V_{sb}	4.2[V]	L_b	20[uH]
V_{ob}	350[V]	C_b	68[uF]
N_1/N_2	20	D_b	0.76

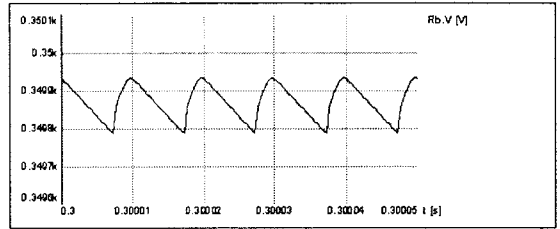


그림 5. 방전시의 출력전압

Fig. 5. Output voltage in discharging process.

5. 결론

본 연구에서는 2차전지를 하나의 변환기로 충전하고 방전할 수 있는 충방전기를 제안하였다.

먼저 충전시에 사용되는 양단 포워드 변환기와 방전시에 사용되는 절연된 부스트 변환기의 설계 이론에 대해 살펴보았으며, 시뮬레이션을 통해 그 가능성을 확인하였다. 또한 이를 바탕으로 하여 충전과 방전을 동시에 수행할 수 있는 충방전기를 제시하였다.

실제적인 충방전기에서는 방전시 직류링크단의 전력을 상용전원단으로 회수하는 회로가 필요하다. 앞으로 본 연구를 바탕으로 계속해서 연구를 진행할 예정이며, 최종적으로 이차전지 충방전기를 실제로 구현하는 것을 목표로 하고 있다.

[참고 문헌]

- [1] 홍순찬, 전희종, 백형래, 원충연, "PSpice를 활용한 전력전자공학", 인터비전, 2002.
- [2] 사가라 이와오, "2차전지 전원의 기술동향", 월간 전자기술, pp.148-154, 2000년 6월호.
- [3] 최해룡, 강병희, 목형수, 최규하, 신우석, "리튬 폴리머 전지의 충방전 특성 해석", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp.222-225, 1999. 7.
- [4] 김명수, 윤인식, 박영진, 윤덕용, 홍순찬, "직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp.464-468, 1999. 7.