

에너지 회수가 가능한 2차전지 충방전시스템용 3상 양방향 AC-DC 컨버터

임승범, 원화영, 채수용, 서영민, 이준영, 고종선, 홍순찬
단국대학교 전자전기공학과

Energy Regenerative 3-Phase Bidirectional AC-DC Converter for the Secondary Battery Charge/Discharge System

Seung-Beom Lim, Hwa-Young Won, Soo-Yong Chae, Young-Min Seo,
Jun-Young Lee, Jong-Sun Ko, and Soon-Chan Hong
Dept. of Electronics and Electrical Eng., Dankook University

ABSTRACT

The electronic products such as laptop PC, cellular phone, robots and etc. need the DC power source. Recently, the secondary battery is frequently used as the portable DC power source and it needs forming process.

In this paper, we proposed the bidirectional converter that the battery can be charged with high power factor and the discharged energy is regenerated into AC power source. In the charging mode, the converter acts as the boost rectifier. And the AC input current is controlled in phase with the AC input voltage. As a result, the power factor is improved nearly to unity. In the discharging mode, the DC power of battery wasted in resistor is regenerated to the AC bus line. Finally, the validity of the proposed bidirectional converter is verified by computer simulations and experimentation.

1. 서론

노트북, 핸드폰 등과 같은 이동형 전자제품, 로봇 등은 전원으로 직류전압원을 필요로 한다. 직류전압원으로 많이 사용되고 있는 2차전지는 생산 과정에서 충전과 방전을 여러 차례 반복하는 화성공정을 필요로 한다. 2차전지 충방전시스템은 그림 1과 같이 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터로 구성된다. 배터리 충전시 AC-DC 컨버터는 교류전압을 직류전압으로 변환시켜주고 DC-DC 컨버터는 일정 전압까지는 정전류 모드로 충전하고, 그 이후에는 정전압 모드로 충전한다. 배터리 방전시 DC-DC 컨버터는 정전류 모드로 방전하며, 방전에너지 저항에서 소모하는 것이 일반적이다^[1].

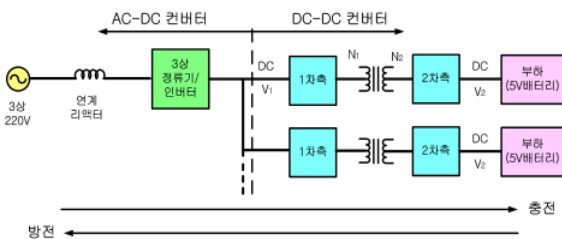


그림 1 2차전지 충방전 시스템
Fig. 1 Secondary battery charge/discharge system

본 논문에서는 고역률 충전과 방전에너지 회수가 가능한 2차전지 충방전시스템용 양방향 AC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 배터리 충전시에는 부스트정류기로 동작하여 교류모션에서 배터리로 전력을 전달하며 변환기 입력전류를 교류전압과 동상으로 제어하여 역률을 1로 한다. 배터리 방전시에는 에너지의 효율적인 이용을 위해 배터리의 직류전력을 저항을 통해 방전하지 않고 정전류 모드로 동작하여 교류모션으로 에너지를 회생하여 효율을 높여준다.

2. 제안한 양방향 AC-DC 컨버터

제안한 양방향 AC-DC 컨버터는 그림 2와 같다. 이를 교류전력부와 직류전력부의 등가회로로 표현하면 그림 3과 같고 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$e_{as} = L_s \frac{di_{as}}{dt} + v_{as} \quad (1)$$

$$e_{bs} = L_s \frac{di_{bs}}{dt} + v_{bs} \quad (2)$$

$$e_{cs} = L_s \frac{di_{cs}}{dt} + v_{cs} \quad (3)$$

전압방정식을 동기속도 ω 로 회전하는 d-q 회전좌표계로 변환하면 식 (4)와 식 (5)가 된다.

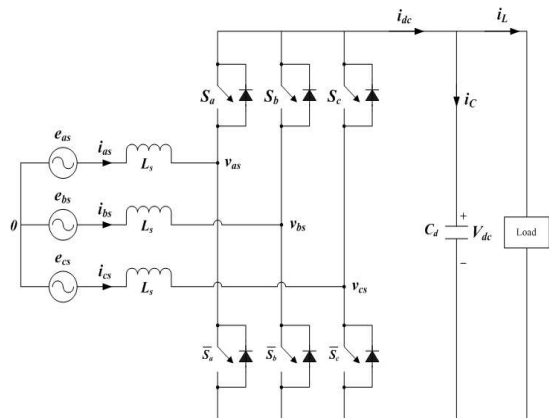


그림 2 제안한 양방향 AC-DC 컨버터
Fig. 2 Proposed bidirectional AC-DC converter

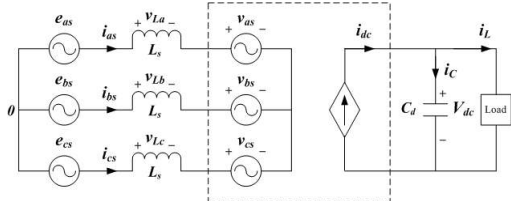


그림 3. 제안한 컨버터의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of proposed converter

$$e_d = L_s \frac{di_d}{dt} + \omega L_s i_q + V_d \quad (4)$$

$$e_q = L_s \frac{di_q}{dt} - \omega L_s i_d + V_q \quad (5)$$

직류측 커패시터의 전압 변동에 관한 수식과 정류기의 입력 전력과 출력 전력의 관계는 다음과 같다.

$$C_d \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_L \quad (6)$$

$$V_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (7)$$

전원측에서 공급하는 유효전력과 무효전력, 그리고 전원전압과 전원전류가 정현파인 경우의 역률은 각각 식 (8), (9), (10)과 같다. 여기서 d축을 α 축과 동상으로 하면 e_q 는 영이 되어 입력전력은 d축 전류에 의해서 결정되고 역률은 q축 전류에 의해서 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서 d축 전류를 유효전력분 전류, q축 전류를 무효전력분 전류라 할 수 있다.

$$P_{input} = e_{as} i_{as} + e_{bs} i_{bs} + e_{cs} i_{cs} = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2} E i_d \quad (8)$$

$$Q_{input} = \frac{3}{2} (e_d i_q - e_q i_d) = \frac{3}{2} E i_q \quad (9)$$

$$PF = \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (10)$$

그림 4는 전압 및 전류 제어 블록도이다. 교류전원측에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력전력보다 클 경우에는 DC링크 전압이 증가하게 되고, 반대로 감소하게 된다. 따라서 입력전력을 출력전력에 맞게 제어함으로써 DC링크 전압을 일정하게 제어할 수 있다. 이는 유효전력분 전류인 d축 전류를 제어하여 DC링크 전압을 제어할 수 있음을 의미한다. d축 전류의 지령치는 다음 식과 같다.

$$i_d^* = (K_{1p} + \frac{K_{1i}}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (11)$$

또한 d축에서 q축으로의 간섭분 $\omega L_s i_d$ 와 q축에서 d축으로의 간섭분 $-\omega L_s i_q$ 으로 인한 영향을 없애기 위하여 간섭분을 미리 보상해주는 비간섭 전류제어를 하고, 전원전압 성분인 e_d 와 e_q 는 전향 보상한다. P-I 전류제어기의 방정식은 식 (12)와 식 (13)과 같다.

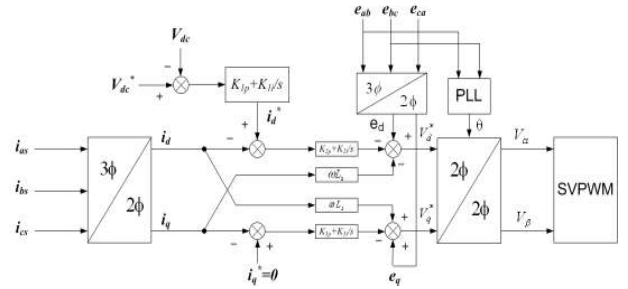


그림 4 전압 및 전류 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of current and voltage control

$$V_d^* = e_d - \omega L_s i_q - (K_{2p} + \frac{K_{2i}}{s})(i_d^* - i_d) \quad (12)$$

$$V_q^* = e_q + \omega L_s i_d - (K_{3p} + \frac{K_{3i}}{s})(i_q^* - i_q) \quad (13)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 양방향 AC-DC 컨버터의 유용성을 확인하기 위하여 SIMPLORer를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 3상 PWM 정류기

입력 전원은 3상 220V이며 승압동작을 확인하기 위하여 출력 전압을 350V로 하였다. 연계 리액터는 3.6mH, 커패시터는 1000μF를 사용하였다. DC-DC 컨버터는 50Ω 부하로 등가화하였고, 초기 커패시터 전압은 311V이다.

그림 5는 정류기 모드에서의 시뮬레이션 파형으로 그림 5(a)는 직류단의 출력전압 파형으로 출력전압이 부스트 동작으로 인하여 350V가 출력되는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 역률 파형으로 과도상태를 제외한 영역에서 역률이 0.99이상임을 알 수 있다. 그림 5(c)와 (d)는 유효전력분 전류와 무효전력분 전류 파형으로서 유효전력분 전류는 출력전압과 관련된 전류이고, 무효전력분 전류는 역률을 1로 제어함에 따라 값이 거의 0임을 알 수 있다.

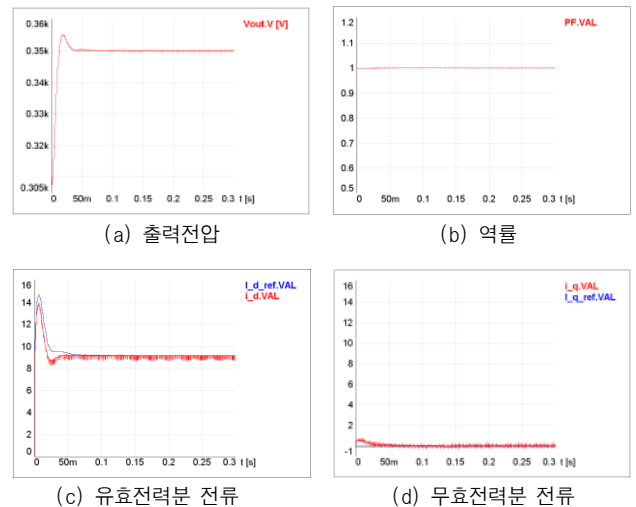
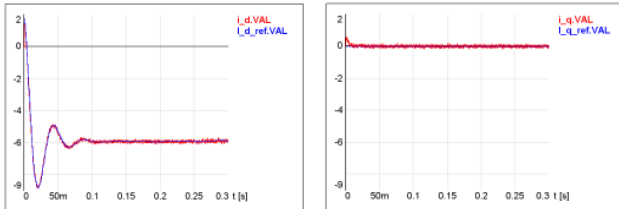


그림 5 정류기 모드 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results in rectifier mode

3.2 3상 PWM 인버터

인버터 모드는 배터리 방전에너지를 교류모션으로 회생하는 구간이며 그림 1의 DC-DC 컨버터에서 정전류 모드로 직류에너지를 방전하므로 DC-DC 컨버터를 5A의 직류전류원으로 대체하였다. 배터리 방전에너지를 교류모션으로 회생하는 기준이 되는 직류모션의 하한전압은 320V로 정하였다. 그 이유는 에너지 회생시 송전단 전압의 위상과 수전단 전압의 위상 차이에 의해서 에너지가 회생되지만 역률을 1로 하기 위해서는 송전단의 전압이 수전단의 전압보다 높아야 하기 때문이다^[2]. 시뮬레이션은 하한전압인 320V에서 실행하였다.

그림 6은 인버터 모드에서의 시뮬레이션 결과로서 그림 6(a)와 (b)는 유효전력분 전류와 무효전력분 전류의 파형이다. 유효전력분 전류는 6[A]이고 무효전력분 전류는 거의 0임을 알 수 있다. 그림 6(c)는 역률 파형으로서 과도상태를 제외한 영역에서 역률이 0.99이상이다. 여기서 유효전력분 전류와 역률이 (-)값을 가지는 이유는 제한한 컨버터가 인버터 동작을 하여 에너지가 전원단으로 회생되는데 정류기 모드시의 변수를 그대로 사용했기 때문이다.



(a) 유효전력분 전류

(b) 무효전력분 전류

(c) 역률

그림 6 인버터 모드 시뮬레이션 결과

Fig. 6 Simulation results in inverter mode

4. 실험 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 양방향 AC-DC 컨버터의 유용성을 확인하기 위하여 축소시스템을 구성하고 실험하였다. 그림 7은 전체 실험장치의 사진이다. 그림 8은 정류기 모드에서의 실험 파형으로 그림 8(a)는 교류모션 상전압 및 상전류의 파형으로서 전압과 전류가 동상으로 제어됨을 알 수 있다. 그림 8(b)는 Voltech사의 전력분석기 PM3300을 사용하여 a상을 측정된 결과로서 전압 및 전류 THD가 4%미만이고 역률은 0.993이다. 그림 9는 인버터 모드에서의 실험 파형으로 그림 9(a)는 교류모션 상전압과 상전류의 파형으로서 전압과 전류가 180도의 위상차를 나타내면서 동작하는 것을 알 수 있고 그림 9(b)는 전력분석기를 사용하여 a상을 측정된 결과로서 인버터 모드에서도 전압 및 전류 THD가 2%미만이고 역률은 0.999이다.

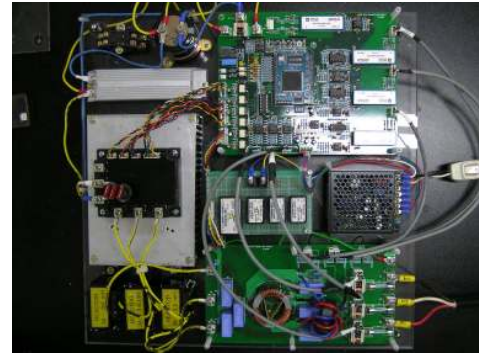
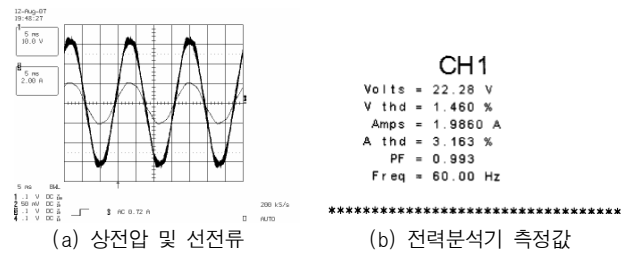


그림 7 전체 실험 장치

Fig. 7 Overall experimental equipment

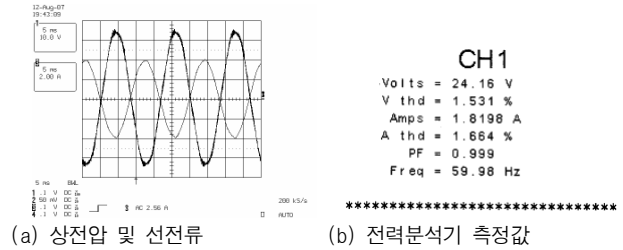


(a) 상전압 및 선전류

(b) 전력분석기 측정값

그림 8 정류기 모드 실험 결과

Fig. 8 Experimental results of rectifier mode



(a) 상전압 및 선전류

(b) 전력분석기 측정값

그림 9 인버터 모드 실험 결과

Fig. 9 Experimental results of inverter mode

5. 결론

본 논문에서는 배터리 충전시에는 정류기로 동작하고 배터리 방전시에는 인버터로 동작하는 양방향 AC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 정류기로 동작시 교류전압과 입력전류를 동상으로 제어하여 역률을 1로 만들어서 효율을 높이고 부스트 동작으로 출력전압을 승압시키게 된다. 그리고 인버터로 동작시에는 교류모션단 전압과 전류가 180 위상차를 가지도록 제어하여 역률을 1로 만들면서 에너지를 회생할 수 있다. 끝으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 정류기 모드와 인버터 모드에서 제안한 회로의 유용성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, "직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제5호, pp.410-415, 2001.
- [2] A. R. Bergen and V. Vittal, Power Systems Analysis, Prentice-Hall, Inc., 2000.