

전기차용 배터리 시뮬레이터의 출력 향상을 위한 양방향 Buck+Boost 컨버터의 스위칭 주파수 변경

김윤재, 남광희
포항공과대학교

Control Frequency Adjustment of Bidirectional Buck+Boost Converter for Increasing Output Power of a Battery Simulator for an Electric Vehicle

Yoon-Jae Kim, Kwanghee Nam
POSTECH

ABSTRACT

본 논문은 배터리 시뮬레이터용 양방향 DC-DC 컨버터에서 스위칭 주파수를 조절하여 넓은 출력 전압 범위에서 출력을 향상시킴을 보였다. 전 부하 영역에서 ZVS를 구현하였고, Psim 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

S_1, S_3 스위치가 닫혀 에너지가 입력으로부터 출력으로 에너지가 전달되고, $t_3 \sim t_4$ 구간은 S_2, S_3 가 닫혀 인덕터에 저장된 에너지가 출력으로 전달되고 출력전압에 의해 인덕터 전류의 방향이 바뀌면서 ZVS에 필요한 레벨 $-I_0$ 까지 내려간다. $t_4 \sim t_5$ 구간은 S_1, S_4 가 ZVS 되기 위한 환류가 일어나며 I_0 에 의한 전도 손실이 발생하므로 짧은 duty를 갖도록 조절한다.

1. 서론

전기차의 연구 개발이 활발해 짐에 따라 모터 및 인버터의 성능 시험에 필요한 다이내모 시스템의 수요가 증가하고 있다. 다이내모 시스템에서 배터리는 전기차의 실제 배터리를 대신하여 인버터의 입력에 필요한 DC 전압을 만들어 주는 역할을 한다. 배터리 시뮬레이터는 1의 3상 AC 전원을 정류하여 DC 전압을 만들어 주는 PWM 컨버터와 부족한 출력 전압의 범위를 넓혀 주는 DC-DC 컨버터로 구성된다. DC-DC 컨버터는 DC 링크 전압을 제어한다. DC 링크 전압은 인버터 제어 및 하드웨어 안전에 중요한 영향을 미치기 때문에 DC-DC 컨버터는 높은 제어 정밀성을 필요로 하며, 양방향 운전이 가능하고, 넓은 출력 전압 범위를 가져야 한다.

본 논문에서는 양방향 Buck+Boost topology를 이용하여 DC-DC 컨버터를 구성하였다.^[1] 전 구간에서 zero-voltage-switching(ZVS)을 구현하여 스위칭 손실을 저감시켰으며, 운전 영역에 따라 스위칭 주파수를 변경하여 넓은 출력 범위에서 출력파워가 향상됨을 확인하였다.

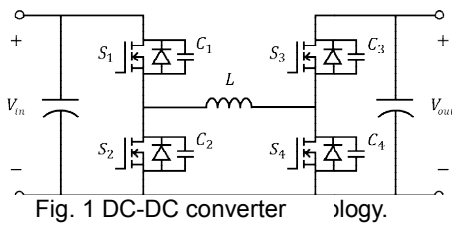


Fig. 1 DC-DC converter topology.

2. 양방향 DC-DC 컨버터 제어

2.1 절 Operation Principle

그림 1은 DC-DC 컨버터의 topology를 보여준다. 두 개의 half-bridge 사이에 인덕터가 연결되어 있다. 인덕터는 입출력 간의 파워를 전달하고, $S_1 - S_4$ 스위치와 resonant를 통해 ZVS를 구현하는 역할을 한다. Boost와 Buck 운전 영역에서 인덕터 양단 전압 및 전류를 각각 그림 2 (a)와 (b)를 통해 나타내었다. $t_1 \sim t_2$ 구간은 스위치 S_1, S_4 가 닫혀 인덕터 양단에 입력 전압이 걸리고 에너지가 인덕터에 저장된다. $t_2 \sim t_3$ 구간은

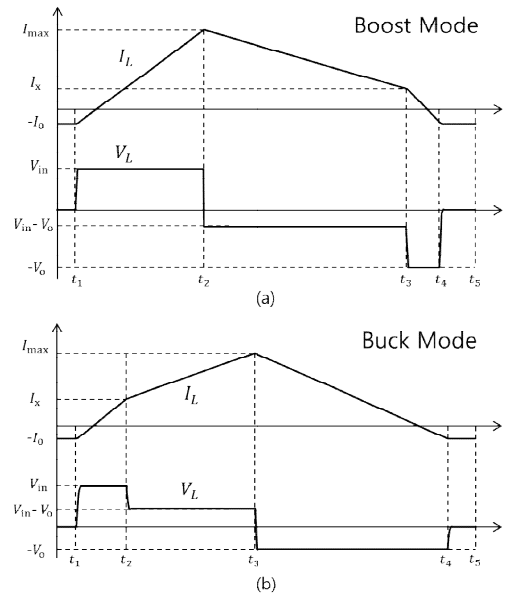


Fig. 2 Inductor current and voltage: (a) Boost and (b) Buck.

Boost 모드에서 스위칭 시간 및 파워는 식 (1), (2)로 정리된다. 파워 계산을 단순화 하기 위해 I_0 를 무시하였다.

$$t_2 - t_1 = L \frac{I_{max} + I_0}{V_n}, \quad t_3 - t_2 = L \frac{I_x - I_{max}}{V_n - V_0}, \quad t_4 - t_3 = L \frac{I_x}{V_0}. \quad (1)$$

$$P_{Boost} = \frac{1}{T_s} \int_{t_1}^{t_3} V_n \cdot i_L(t) dt = \frac{V_n V_0}{2} \cdot \frac{V_n I_x^2 - V_0 I_{max}^2}{V_n^2 I_x - V_0^2 I_{max}}. \quad (2)$$

Buck 모드의 스위칭 시간과 파워는 (3), (4)로 정리된다.

$$t_2 - t_1 = L \frac{I_x + I_0}{V_n}, \quad t_3 - t_2 = L \frac{I_{max} - I_x}{V_n - V_0}, \quad t_4 - t_3 = L \frac{I_{max}}{V_0}. \quad (3)$$

$$P_{Buck} = \frac{1}{T_s} \int_{t_1}^{t_3} V_n \cdot i_L(t) dt = \frac{V_n V_0}{2} \cdot \frac{V_0 I_x^2 - V_n I_{max}^2}{V_0^2 I_x - V_n^2 I_{max}}. \quad (4)$$

2.2 절 Maximum Power Control

인덕터 최대전류 I_{max} 는 설계 단계에서 결정되므로

출력 파워는 식 (2), (4)를 통해 I_x 의 함수로 표현된다. 파워를 I_x 에 대해 미분하여 최대를 출력하는 전류 I_x 를 구하면 Boost 모드에서는 식 (5)로 정리되고

$$I_x = \frac{I_{m \max}}{V_h^2} \cdot \left(V_o^2 - \sqrt{V_o(V_o^3 - V_h^3)} \right), \quad (5)$$

Buck 모드에서는 식 (6)으로 정리된다.

$$I_x = \frac{I_{m \max}}{V_o^2} \cdot \left(V_h^2 - \sqrt{V_h(V_h^3 - V_o^3)} \right). \quad (6)$$

I_x 를 통해 식 (1), (3)에서 스위칭 주파수가 결정된다. 그림 3는 식 (5), (6)을 통해 압이 360 V이고 $I_{m \max}$ 가 140 A, L 은 7 μ H 일 때 전압에 대한 최대 파워와 이 때의 스위칭 주파수를 낸 것이다. 배터리 시뮬레이터가 모든 출력 전압 범위에서 500 A의 출력 전류를 요구하고 10개의 병렬 모듈을 통해 제어를 할 때 한 모듈에 요구되는 파워 출력을 시에 나타내었다.

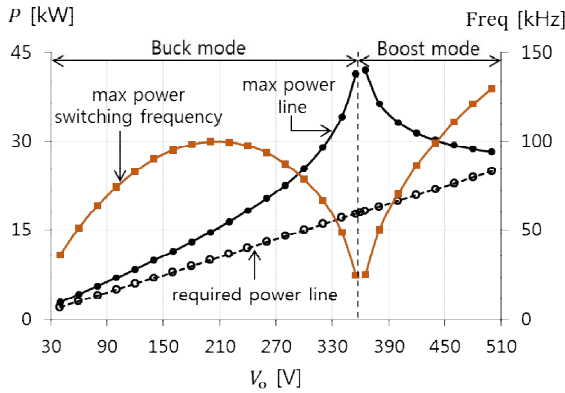


Fig. 3 Max output power depending on switching frequency

2.3 절 g an Low V_o ag Operation

일반적인 전기차의 배터리는 V이상의 전기차 구동용 고전압 배터리와, 50 V 내외의 하이브리드 시동 및 발전기용 저전압 배터리 두 |이다. 그림 3은 출력전압이 150 V 이상일 때 100 kHz의 스위칭 주파수 근처에서 최대 출력파워가 : 알 수 있다. 입력전압과 출력전압이 비슷해지는 ;0 V 근처에서는 스위칭 주파수가 감소할수록 파워가 증가하지만, 이 영역에서는 인덕터 전류를 최대값에 짧게 긴 시간동안 파워를 전달 할 수 있으므로 최대 출력 파워가 크게 증가하여 100 kHz에서도 출력에 | 없다.

그러나 90 V 이하의 저전압 출력 범위에서는 최대파워와 요구 파워의 차이가 의 없어지고, 이때 최대 파워 스위칭 주파수는 점점 하기 때문에 100 kHz로 출력 요구사항을 만족 시킬 | 없다. 그림 4는 100 kHz 제어 시 컨버터의 최대파워와 50 kHz 제어 시 최대파워를 비교한 것이다. V 이하의 저전압 범위에서는 스위칭 주파수를 50 kHz | 감소시킴으로써 출력 요구사항을 만족시킬 수 있다. |아서 90 V 이하의 저전압 운전 모드와 그 이상의 !압 운전 모드를 나누어 스위칭 주파수를 조절함으로써 각 조건에서 모두 출력을 크게 향상 시킬 수 있다. 그림 4의 (b)를 통해 50 kHz 스위칭 주파수가 저전압 |에서 100 kHz보다 향상된 출력을 가짐을 확인할 수 있다.

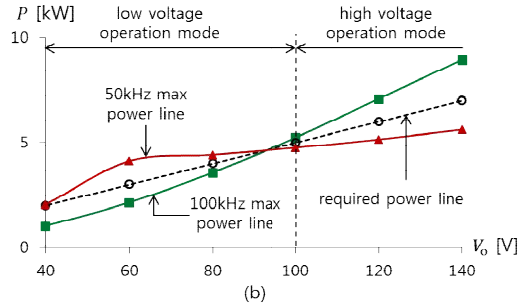
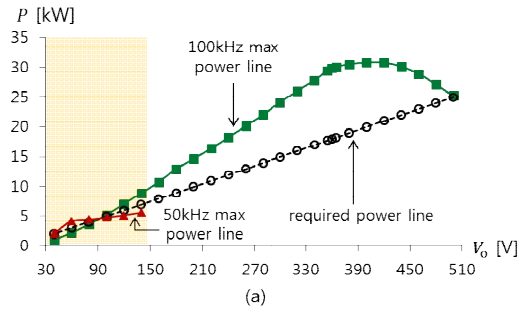


Fig. 4 Output power with 100 kHz vs. 50 kHz: (a) wide range of V_o , (b) extended view of low V_o

3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 Psim 시뮬레이션을 통해 제안된 스위칭 주파수 변경이 최대 및 출력 전압에서 각각 출력 전류 기준을 만족하는 것을 보였다. 시뮬레이션의 입력 및 인덕터 조건은 그림 3에서와 같다.

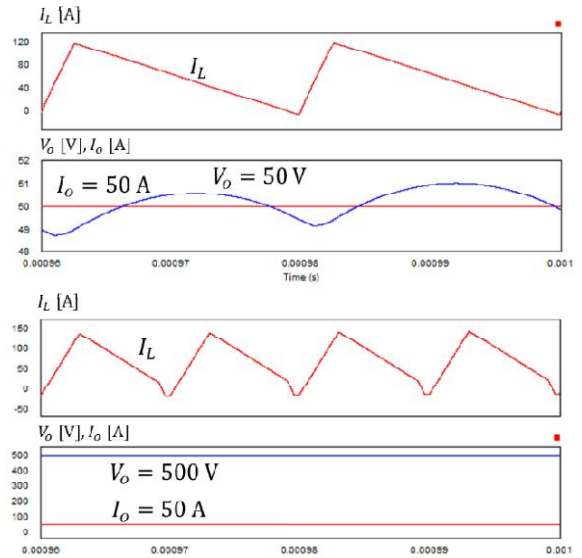


Fig. 5 Psim simulation results. $V_o = 50$ V and $V_o = 500$ V.

참고 문헌

- [1] S. Waffler and J. W. Kolar "A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1589-1599, Jun. 2009.