

넓은 입력 전압범위와 빠른 응답속도를 갖는 고승압 양방향 DC-DC 컨버터

김재훈¹, 김상진¹, 김선주¹, 최세완[†], 신현덕²
 서울과학기술대학교, (주)엔시스

Bi-directional DC-DC converter with wide input voltage range and fast response for High Step-Up Applications

Jaehoon Kim¹, Sangjin Kim¹, Sunju Kim¹, Sewan Choi[†], Hyunduk Shin²
 Seoul National University of Science and Technology, ENSIS Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문에서는 넓은 범위의 입력전압에서의 빠른 응답속도를 가진 고승압 양방향 컨버터를 제안한다. 제안하는 시스템은 2대의 Buck컨버터와 SRC(Seris Resonant Covnerter)로 구성된 3-stage 구조이며, 고승압이 가능하고 넓은 입력전압 범위에서 고효율을 성취할 수 있다. 또한 제안하는 컨버터는 모든 전압 범위에서 빠른 응답속도로 제어를 하며 CC(Constant Current), CV(Constant Voltage), CP(Constant Power) 및 Pulse 동작을 수행한다. 제안하는 양방향 컨버터의 1.8kW급 시작품으로 실험을 통하여 타당성을 검증하였고, 최고효율 96%, 정격효율 90.8%를 달성하였다.

1. 서 론

Li-ion battery Cell은 일반적으로 2V~4V의 낮고 넓은 출력전압특성을 가지며 응용에 따라 배터리의 직·병렬 연결이 요구된다[1]. 따라서 배터리 충·방전 응용에서는 배터리 Cell 단위 시험을 위해 넓은 입력전압 범위를 만족하는 고승압 절연형 DC-DC 컨버터가 요구된다. 또한 배터리의 수명을 증가시키기 위해 고주파 펄스 동작이 가능해야 하므로 컨버터의 빠른 응답 특성이 요구된다.[2] 일반적으로 단일 구조의 양방향 절연형 컨버터로는 DAB(Dual Active Bridge) 컨버터, CLLC 공진형 컨버터 그리고 SRC(Series Resonant Converter)를 많이 사용해 왔다. 하지만 DAB 컨버터는 넓은 입력전압의 변동이 클 경우 위상각의 변동범위 증가로 인해 소프트 스위칭 영역이 감소하며 무효전력 증가로 인해 소자들의 전류경격이 증가하고 변압기의 최적설계가 어렵다는 단점이 있다[3]. CLLC 공진형 컨버터는 양방향으로 소프트 스위칭이 가능하지만 입·출력 전압의 차이가 클 때 변압기의 턴 비 차이로 인해 동작점이 크게 변하여 최적설계가 힘들고, 제어가 복잡하다는 단점이 있다[4]. 따라서 비절연 컨버터와 절연형 컨버터를 결합한 다단 구조의 DC-DC 컨버터가 많이 사용되어 오고 있다[5].

본 논문에서는 최대 200배, 최소 13배의 승·강압을 위한 3-stage 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 고전압측 벡 컨버터, 절연형 컨버터, 저전압측 벡 컨버터로 구성되며, 3-stage의 다단 구조에서 고효율을 달성하기 위해 SRC는 항상 고정 듀티, 고정주파수로 Load independent point에서 동작하게 하였다. 따라서 부하·전압에 관계없이 소프트 스위칭을 성취할 수 있으며 변압기를 최적으로 설계할 수 있다. 고전압측 벡 컨버터는 전압제어, 저전압측 벡 컨버터는 전류제어를 하며 60A/1ms의 빠른 응답속도로 CC, CV, CP, Pulse 동작을 수행한다.

2. 제안하는 컨버터

그림 1과 같이 제안하는 3-stage 시스템은 SRC 컨버터와 벡 컨버터 두 개로 구성되어 있다. 3-stage 구조의 필요성을 위해 SRC측에 topology morphing 기법을 적용한 2-stage 컨버터와 제안하는 3-stage 시스템의 특성 비교를 표 1에 나타내었다. Topology morphing 기법은 SRC의 입·출력 전압의 상황에 따라 1·2차측 브릿지의 스위칭 방식을 다르게 하는 기법을 말한다. 1·2차측을 Full-bridge 혹은 Half-bridge로 동작시키거나, 1차측을 Half-bridge, 2차측을 Full-bridge로 동작시키는 등 Full-bridge와 Half-bridge 스위칭을 입·출력 전압 상황에 따라 선택적으로 사용하는 스위칭 기법을 말한다. 이 스위칭 방식은 고정 듀티, 고정주파수로 동작하며 브릿지의 스위칭 방식만 달라지기 때문에 SRC가 항상 최적점에서 동작하면서 제한적으로 출력전압을 가변할 수 있다는 장점이 있다. 여기서 부스트 컨버터의 최대 승압비는 인덕터의 기생저항성분과 스위치의 $R_{DS(on)}$ 등으로 고려하여 3배로 가정하였다. 따라서 나머지의 승압은 SRC 측에서 부담을 해야 하므로 2-stage 시스템의 경우 변압기의 턴 비가 커지게 되며, 그에 따라 누설인덕턴스가 상승하여 공진소자 공차에 따른 게인 변동이 커지는 단점을 갖는다. 또한 2-stage의 경우 넓은 전압범위에서 동작하기 위해 topology morphing 기법을 적용해야 하므로 SRC의 1, 2차 측을 모두 풀 브릿지 구조를 사용해야 하기 때문에 스위치 개수가 증가한다는 단점을 갖는다. 반면, 제안하는 시스템의 고 전압측 벡 컨버터는 링크전압(V_{DC})을 제어하며, SRC는 0.5의 고정 듀티, 고정주파수로 동작하여 모든 범위에서 소프트 스위칭을 성취하며, 10배의 승·강압 동작을 수행한다. 그리고 저 전압측 벡 컨버터는 배터리측 전류를 제어하며, 60A/1ms의 응답속도로 배터리 전류를 제어하기 위해 저 전압측 벡 컨버터의 인덕터는 식 (1)과 같이 설계되어야 한다.

$$\therefore L = \frac{V_{LB2}}{\Delta I} DT (\because V_{LB2} = V_{link} - V_L) \quad (1)$$

주어진 입·출력 전압 사양에서 인덕터 양단에 걸리는 가장 작은 전압은 4V이며, i_L 이 0A에서 60A까지 올라가는데 걸리는 시간은 1ms, 그리고 인덕터 전류를 상승시키기 위한 최대 듀

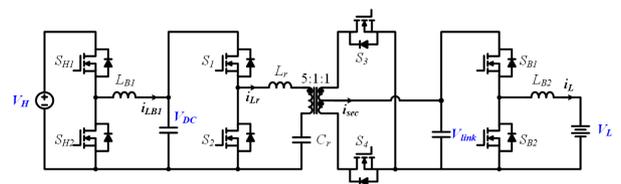


그림 1. 제안하는 3-stage 시스템

표 1 stage 별 특성 비교

	2-stage (SRC-Buck)	3-stage (Buck-SRC-Buck)
토폴로지		
제어방식	SRC : 고정주파수, 고정주파수 + Topology morphing 백컨버터 : 전류제어	고전압측 백컨버터 : 전압제어, 저전압측 백컨버터 : 전류제어 SRC : 고정주파수, 고정주파수
스위치 개수	10	8
최소 턴비	20 : 1	5 : 1 : 1
누설인덕턴스	23μH	7.7μH
이슈사항	S _{L1} 스위치의 전류정격(101A), 높은 턴비로 인한 누설인덕턴스	많은 스테이지 수

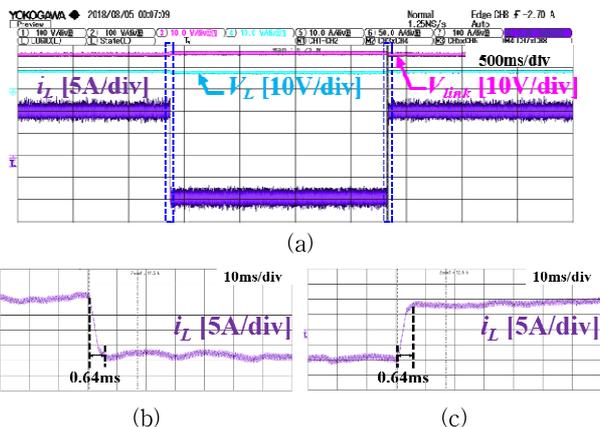


그림 2. 시스템 응답속도(60A/1ms) 실험파형 (a) 충·방전 모드전환 실험파형 (b) 충전→방전 모드전환 확대파형 (c) 방전→충전 모드전환 확대파형

타는 1, DC 바이어스는 없다고 가정하면 다음과 같다.

$$\therefore L = \frac{V_{link} - V_L}{\Delta I} DT = \frac{4V}{60A} \cdot 1ms = 66\mu H \quad (2)$$

따라서 식 (2)와 같이 계산된 인덕턴스보다 작은 값의 인덕턴스를 사용해야 60A/1ms의 목표 응답속도를 달성할 수 있다.

3. 실험 결과

제안하는 양방향 컨버터의 동작 및 타당성을 입증하기 위해 아래 설계사양에 따라 실험을 하였다.

- $P_{O(max)} = 1.8kW$ • $V_H = 400V$ • $V_L = 2V \sim 30V$
- $f_{sw(SRC)} = 40.5kHz$ • $f_{sw(Buck)} = 30kHz$

그림 2는 저전압측 전압 8V, 고전압측 전압 400V 일 때의 충·방전 모드전환 실험파형으로 60A/1ms의 응답을 따라가는 것을 확인할 수 있다, 그림 3는 제안하는 컨버터의 효율로 배터리 방전모드 동작 시 최고효율 96%, 정격 부하 1.8kW에서 90.8%를 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는 넓은 출력범위에서 1ms 동안 60A의 빠른 응답속도를 가진 양방향 컨버터를 제안하였다. 제안한 3-stage 시스템은 2 대의 Buck 컨버터와 SRC 컨버터로 구성되어 있어

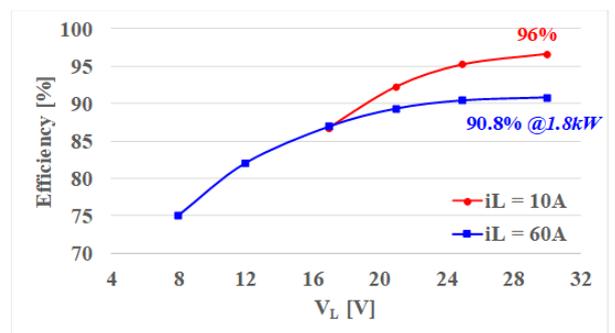


그림 3. 제안하는 컨버터의 효율

넓은 전압범위에서 최대 200배의 승·강압을 성취할 수 있다. 1.8kW급 시작품을 제작하였으며, 제안한 컨버터의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi and C. Tassoni, "Battery choice and management for new-generation electric vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1343-1349, Oct. 2005.
- [2] H. Lim, "Process for recycling waste battery," Korean Patent 10-1535051, 2. July. 2015.
- [3] Tuan Ngo, KilHo Lee, Jehyuk Won and Kwanghee Nam, "Study of single-phase bidirectional battery charger for high power application," *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Harbin, 2012, pp. 958-962.
- [4] W. Chen, P. Rong and Z. Lu, "Snubberless Bidirectional DC-DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 9, pp. 3075-3086, Sept. 2010.
- [5] J. Park and S. Choi, "Design and Control of a Bidirectional Resonant DC-DC Converter for Automotive Engine/Battery Hybrid Power Generators," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3748-3757, July 2014.