

0V에서 100V까지 충·방전이 가능한 15kW 절연형 DC-DC 컨버터

김익순, 이동한, 김재훈, 최세완
서울과학기술대학교

15kW Isolated DC-DC Converter for Charging/Discharging from 0V to 100V

Iksun Kim, Donghan Lee, Jaehoon Kim, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 0V에서 100V까지 매우 높은 승·강압비를 갖는 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 시스템은 2-Stage 구조로 SRC(Series Resonant Converter)와 DBC(Differential Buck Converter)로 구성된다. 제안하는 컨버터의 출력 전압은 두 개의 각 벽 컨버터 출력 전압의 전위차로 결정되기 때문에 0V에서도 높은 전압으로 승압이 가능하다. 본 논문에서는 제안하는 컨버터의 타당성을 검증하기 위하여 15kW급 시작품을 제작하였고 96.27%의 최고효율을 달성하였다.

1. 서론

전기자동차, 신재생에너지, 배터리 등 여러 산업 응용 분야에서는 제품 개발 및 검증을 위해 양방향 DC 전원 공급 장치 및 배터리 충·방전기가 요구된다. 이와 같은 장비는 전기적 절연과 함께 0V에서 수 kV의 넓은 출력전압 특성이 필요하며, CC, CV, CP 동작시 매우 빠른 전류 응답속도가 요구된다.

단일 구조의 양방향 절연형 컨버터인 CLLC 공진형 컨버터와 DAB(Dual Active Bridge)는 스위치의 ZVS 턴 온이 가능하지만, 본 응용과 같이 전압범위가 매우 넓은 경우 각각 주파수 범위와 위상각이 커져서 자성체의 최적설계가 어렵고, 넓은 전압범위 동작시 순환전류가 커져서 효율이 매우 낮아지는 문제가 있으므로 본 응용에 적합하지 않다.^[1,2] 따라서 전압범위가 넓은 응용에서 절연형 컨버터와 비절연 벅-부스트 컨버터의 2단 구조를 고려할 수 있다. 그러나 대전력에서 양방향 벅 컨버터는 회로 내 기생성분으로 인해 승압이 제한되어 일반적으로, 시비율 0.7 정도까지만 사용하며 고승압 동작이 불가능하다.^[3,4] 본 논문에서는 0V와 같이 극 저압에서도 승압이 가능한 양방향 절연형 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 시스템은 SRC와 DBC로 구성되며, 고효율 및 자성체 최적설계를

위해 SRC는 항상 고정주파수, 고정 듀티로 동작하고 DBC는 출력 전압 및 출력 전류제어를 하며 150A/4ms의 빠른 응답속도로 CC-CV 동작을 수행한다.

2. 제안하는 컨버터

그림 1은 제안하는 컨버터의 시스템 제어 알고리즘이며, 양방향 절연형 DC-DC 컨버터 회로는 그림 2와 같다. 그림 3은 제안하는 컨버터의 동작 시퀀스이다. Buck 1은 인덕터 전류(i_{L1}) 및 $V_{C1}(=V_{C2}+V_O)$ 전압을 제어하여 150A/4ms의 빠른 응답속도로 CC-CV 동작을 수행하고, Buck 2는 출력전압(V_{C2})을 고정전압(50V)으로 제어한다. SRC는 제어를 하지 않기 때문에 변압기의 최적 설계가 가능하다. 또한 변압기의 L_m 크기에 따라 스위치가 1) ZVS 턴 온/하드스위칭 턴 오프 2) ZCS 턴 온/턴 오프의 두 가지 동작이 가능하다. 그림 4는 L_m 의 크기에 따른 두 가지 스위치 동작에 대한 SRC 1차측 스위치의 계산된 손실을 나타낸다. 작은 L_m 을 사용할 경우, 턴 온 손실은 감소하지만, 턴 오프 및 L_m 전류에 의한 도통손실이 증가하여 총 스위칭 손실이 더 크다. 따라서 본 응용에서는 ZCS 턴 온/턴 오프가 가능한 큰 L_m 을 사용하였다. DBC의 출력전압(V_O)은 벅 컨버터 각각의 출력전압(V_{C1} , V_{C2})의 전위차에 의해서 결정된다. 따라서 각각의 벅 컨버터의 출력전압(V_{C1} , V_{C2})이 같으면 출력전압(V_O)이 극 저전압($V_O \approx 0V$)이 되므로 매우 높은 승·강압비를 갖는 장점이 있다.

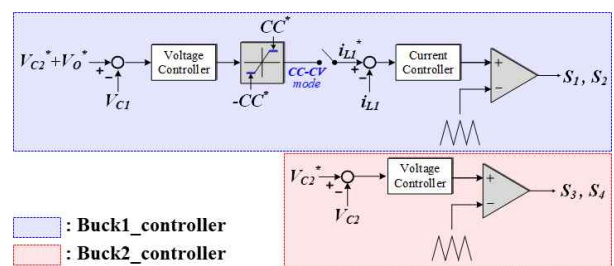


그림 1. 제안하는 컨버터의 제어 알고리즘

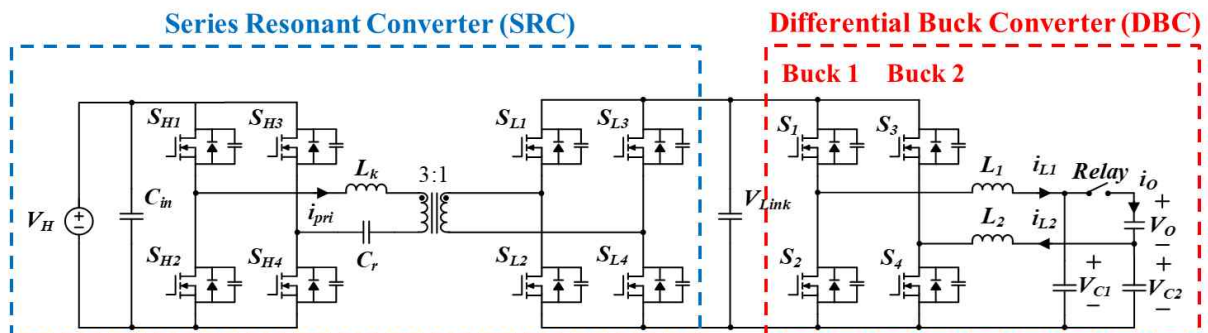


그림 2. 제안하는 양방향 절연형 DC-DC 컨버터

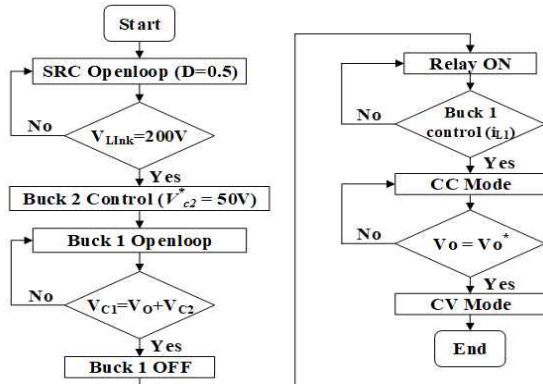


그림 3. 제안하는 컨버터의 동작 시퀀스

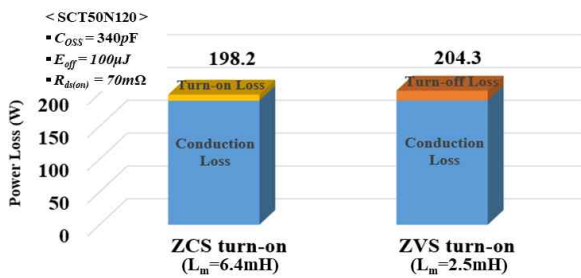


그림 4. L_m 크기에 따른 SRC 1차측 스위치 손실 계산 비교

3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 성능을 검증하기 위하여 15kW급 시작품을 제작하였고 실험 사양은 다음과 같다.

- $P_o = 15kW$ $V_H = 600V$ $V_o = 0V \sim 100V$
- $V_{Link} = 200V$ $f_{SW(SRC)} = 37.5kHz$ $f_{SW(Buck)} = 30kHz$

그림 5는 정상상태일 때의 SRC 스위치 전압(V_{SH1} , V_{SH2} , V_{SL1} , V_{SL2}) 및 입력전압(V_H), 공진 전류(I_{pri} , I_{sec}) 파형으로 1, 2차측 모든 스위치가 ZCS 턴온 및 턴오프를 성취한다. 그림 6은 정상상태일 때 DBC 스위치 전압(V_{S1} , V_{S4}) 및 출력 전압(V_o), 각 벽 컨버터의 인덕터 전류(I_{L1} , I_{L2}) 파형이다. 그림 7은 출력전압이 1V 일 때의 방전 실험파형으로 극 저전압에서도 동작이 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 출력전압 100V 때의 충·방전 모드전환 실험파형으로 150A/4ms의 응답속도를 달성하였다. 그림 9는 출력전압 별 부하에 따른 측정 효율이며 최고 효율은 충전모드 96.21%, 방전모드 96.27%로 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는 높은 승·강압비를 갖는 양방향 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 회로는 2-stage인 SRC와 DBC로 구성되었고, 매우 높은 승압비를 가지며 빠른 응답속도(150A/4ms)를 만족한다. 15kW 시작품을 통해 제안하는 토폴로지의 성능(최고효율 96.27%)을 검증하였다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No.2020R1A2C2006301)

참고 문헌

[1] W. Chen, Z. Lu, "Snubberless Bidirectional DC-DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss," IEEE Trans. Ind. Electron.,

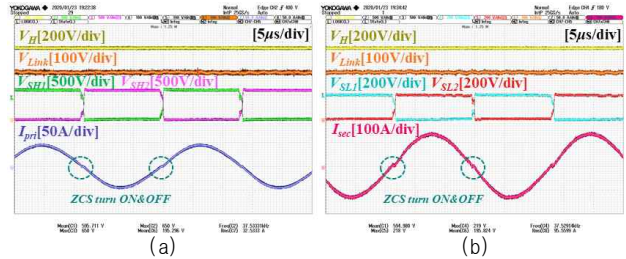


그림 5. SRC 정상상태 파형 (15kW 부하)

(a) 1차측 스위치 전압 및 공진 전류 (b) 2차측 스위치 전압 및 공진 전류

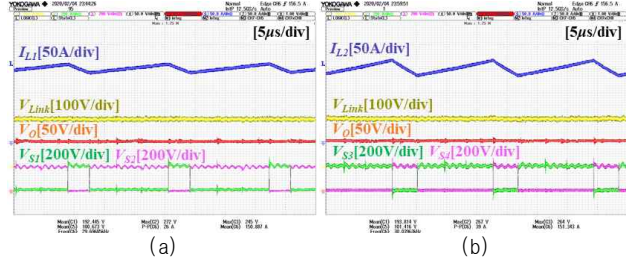


그림 6. DBC 정상상태 파형(15kW 부하)

(a) Buck 1 스위치 전압 및 전류 (b) Buck 2 스위치 전압 및 전류

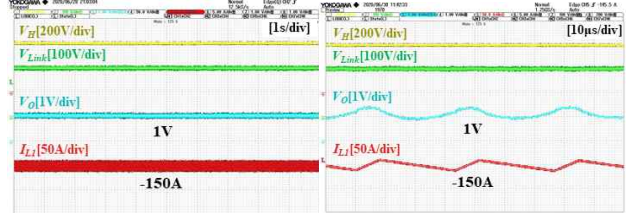


그림 7. 출력전압 1V 시 방전 실험파형 (a) 1s/div (b) 10μs/div

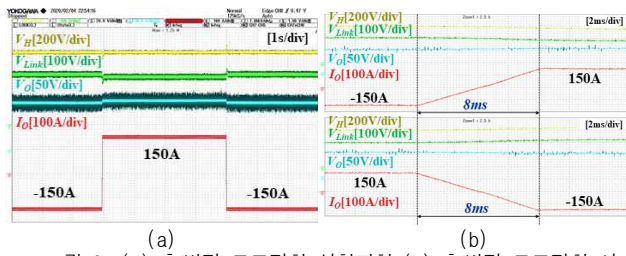


그림 8. (a) 충전전 모드전환 실험파형 (b) 충전전 모드전환 시 출력전류 응답속도(-150A → 150A, 150A → -150A)

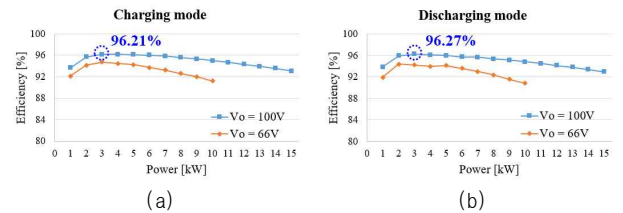


그림 9. 각 출력전압별 부하에 따른 효율 (a) 충전 모드 (b) 방전 모드

Vol. 57, pp. 3075-3086, Sep. 2010.

[2] Rik W.A.A. De Doncker, "A Three-phase Soft-Switched High-Power-Density dc/dc Converter for High-Power Applications", IEEE Trans. Ind. Applications. VOL. 27, pp. 63-73, Jan. 1991.

[3] 양진영, 최세완, "연료전지 응용을 위한 높은 승압비와 낮은 전류리플을 갖는 무변압기형 부스트 컨버터", 전력전자학회 논문지, pp. 79-87, 2008.

[4] 정현주, 최세완, "레독스 흐름 전지용 양극성 전압을 갖는 DC-DC 컨버터의 최적 PWM 스위칭 기법", 2015 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 301-302, 2015.