부스트 프리레귤레이터가 통합된 고효율 고정-주파수 LLC 공진형 컨버터

최승현, 김재상, 김태우, 문건우
한국과학기술원

High-Efficiency Fixed-Frequency LLC Resonant Converter With Integrated Boost Preregulator

Seung-Hyun Choi, Jae-Sang Kim, Tae-Woo Kim Gun-Woo Moon
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 부스트 프리레귤레이터가 통합된 새로운 고효율 고정-주파수 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 기존 부스트 프리레귤레이터가 사용된 2단-구조의 컨버터는 연속적인 입력전류 및 넓은 전압이득 범위를 가져 태양광 및 연료전지에 적합한 토폴로지이다. 하지만, 부스트 프리레귤레이터 단에서 하드 스위칭으로 인한 큰 스위칭 손실, 큰 다이오드 도통 손실이 발생하여 낮은 효율을 갖는 문제가 발생한다. 따라서 이를 해결하기 위해, 제안된 회로는 부스트 프리레귤레이터를 통합시킨 새로운 구조를 사용하여 모든 스위치의 영전압 스위칭을 달성하고, 다이오드를 소거하였다. 따라서 제안된 회로는 높은 효율을 갖는다. 제안된 회로의 효용성을 증명하기 위해, 24-32V 입력전압과 12-16V(200W)출력에서 실험이 진행되었다.

1. 서론

태양광 및 연료전지 발전기는 가솔린 및 디젤연료 기반의 발전기와 달리, 유해 배출가스가 발생하지 않고 진동 및 소음이 작다는 이점을 갖는다.[1] 따라서 저소음 및 고밀도가 요구되는 휴대용 발전기에 많이 적용되어, Horizon Fuel Cell Technologies 사의 AQUIGEN 180과 같은 여러 상용 제품이 개발되었다.

이러한 태양광, 연료전지 등 분산 전원의 출력을 제어하기 위해서 DC/DC 컨버터가 적용된다. 여기서 태양광은 최대 전력점 추종을 위해, 연료전지는 수명 향상을 위해 일반적으로 연속적인 전류가 요구된다.[2] 따라서 DC/DC 컨버터는 연속적인 입력전류를 갖도록 설계되어야 한다.[3]

그림 1(a)의 부스트 프리레귤레이터가 사용된 2단-구조 DC/DC 컨버터는 위의 두가지 조건을 만족한다.[4] 부스트 프리레귤레이터가 사용되어 연속적인 입력전류를 갖고, 부스트 컨버터의 전압이득을 통해 넓은 입력전압 범위에서 동작하도록 설계될 수 있기 때문이다. 하지만, 부스트 프리레귤레이터 스위치의 하드 스위칭으로 인한 큰 스위칭 손실 및 다이오드의 큰 도통손실로 인해 낮은 효율을 갖는 문제점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 새로운 부스트 프리레귤레이터 통합형 구조를 적용하였다. 통합된 부스트 프리레귤레이터 구조를 통해, 모든 스위치의 영전압 스위칭을 달성하고 다이오드를 소거하였다. 따라서 제안된 회로는 저감된 스위칭 손실 및 도통손실을 가져 높은 효율을 달성할 수 있다.

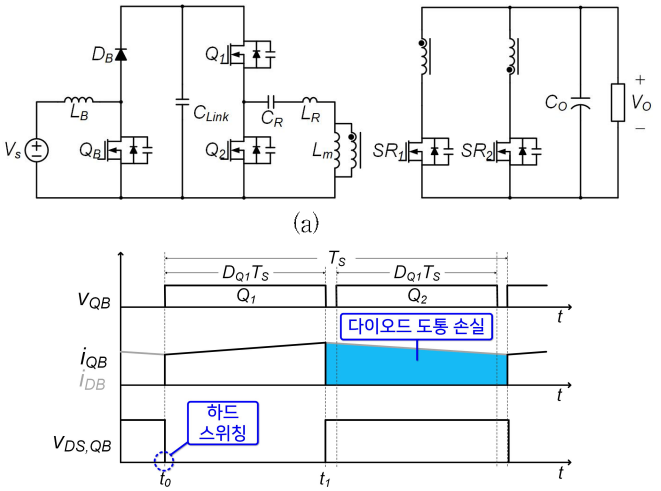


그림 1. 기존 컨버터 특징. (a) 회로 구조, (b) 주요 파형

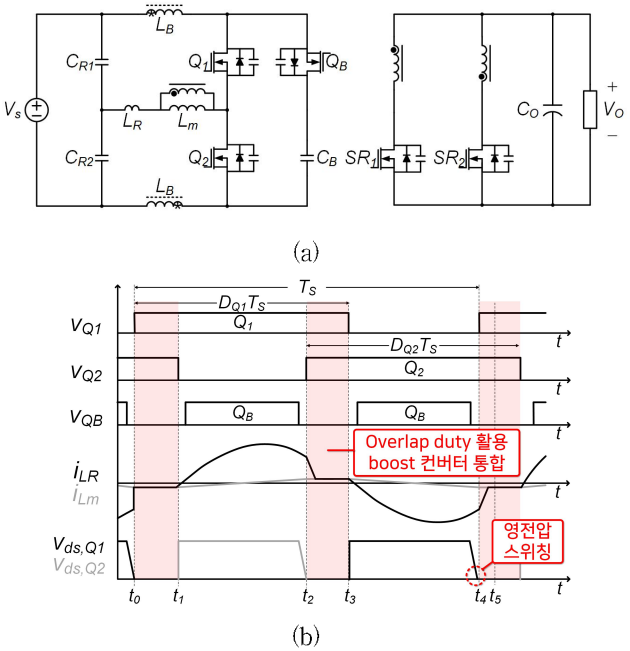


그림 2. 제안된 회로의 특징. (a) 회로 구조, (b) 주요 파형

2. 제안된 회로

2.1 제안된 회로의 특징

제안된 회로는 그림 2(a)와 같다. 기존의 회로는 부스트 컨버터와 고정 주파수 LLC 공진형 컨버터를 2단 구조를 갖고 있다. 반면 제안된 회로는 부스트 인덕터가 결합 인덕터로 대체되었고, 스위치 구조 및 시비율 조절 방법을 변경함에 따라 단일 단으로 구성된다. 부스트 컨버터를 통합함에 따라, 기존 컨버터의 다이오드를 소거하여 소자 수를 저감하고, 도통 손실을 저감시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 제안된 회로는 모든 스위치의 영전압 스위칭을 달성하여 고효율을 달성할 수 있는 이점을 갖는다.

2.2 제안된 회로의 전압 이득

제안된 회로의 전압 이득은 변압기의 자화 인덕턴스 L_m 및 공진 인덕터 L_R에 전압-시간 평형 원리를 적용하면 도출해낼 수 있다. 도출된 제안된 회로의 전압 이득은 아래 수식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_O / V_S = 1/4n(1-D_{Q1}) \quad (1)$$

수식을 통해 볼 수 있듯이, 제안된 회로는 스위치 Q1 및 Q2의 시비율을 조절함에 따라서 전압이득을 변경할 수 있다. 그림 3은 제안된 회로의 전압 이득 및 설계 방법이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 최소 입력전압 및 최대 출력 전압 사양에서 높은 시비율로 동작하도록 설계된다. 이를 통해서 태양광 및 연료전지의 넓은 전압 범위에 대응하여 동작할 수 있다.

2.3 프로토타입 실험 프로파일

제안된 회로의 효용성을 증명하기 위해, 24V-32V 입력, 12V-16V/200W 출력 프로토타입 실험이 진행되었다. 실험 사양은 Horizon Fuel Cell Technologies 사의 AQUIGEN 180을 참조하였다. AQUIGEN은 태양광 및 연료전지를 통해 배터리를 충전하는 방식이다. 충전 프로파일은 그림 4와 같다. 배터리의 전압이 저전압 상태일 때, 배터리 충전을 시작한다. 그 후, 배터리 전압이 16V에 도달할 때까지 가용 최대 전력을 활용하여 배터리를 충전한다. 따라서 효율 측정은 200W 고정 출력을 가정하고, 배터리 전압을 변경하며 진행되었다.

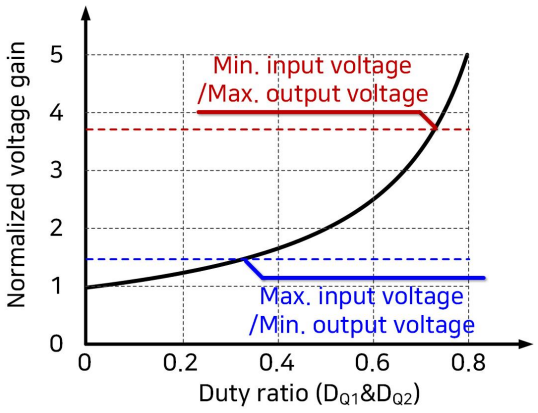


그림 3. 제안된 회로의 정규화된 전압 이득 및 설계

표 1 기존 회로 및 제안된 회로의 설계사항

	기존 회로	제안된 회로
변압기 (L_m, N_P:N_S)	PQ2625 (20μH, 3:2)	
인덕터 (L_B, N)	PQ3220 (40μH, 15)	PQ2620 (10μH, 5:5)
공진 커패시터 (C_R)	3μF x 1	0.94μF x 2
메인 스위치 (Q_1, Q_2, Q_B)	IPP100N08N3G (80V/51A/9.7mΩ)	
정류기 스위치 (SR_1, SR_2)	IPP020N06N (60V/120A/1.8mΩ)	
다이오드 (D_B)	30CTQ080 (80V/30A/0.83V_f)	-

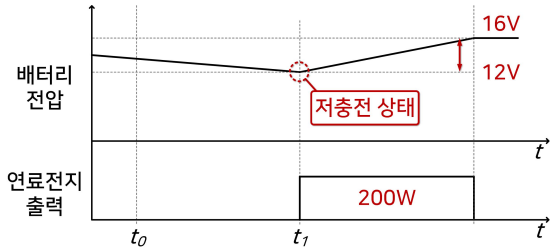
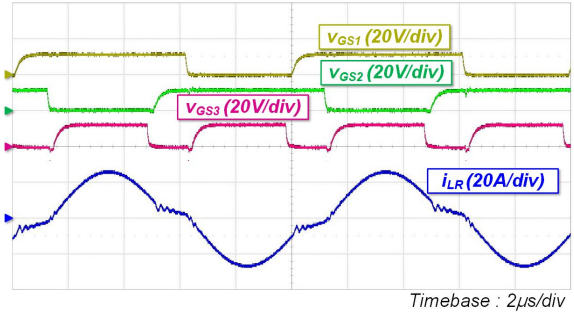
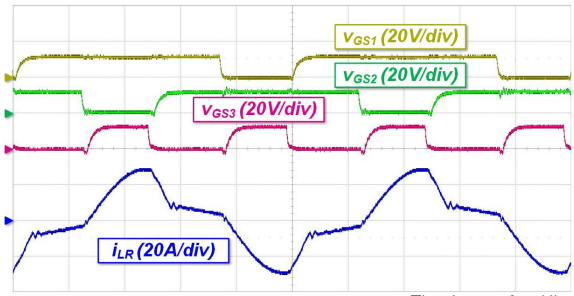


그림 4. 연료전지를 통한 배터리 충전 프로파일



(a)



(b)

그림 5. 제안된 회로의 실험 파형. (a) 12V/200W출력, (b) 16V/200W 출력

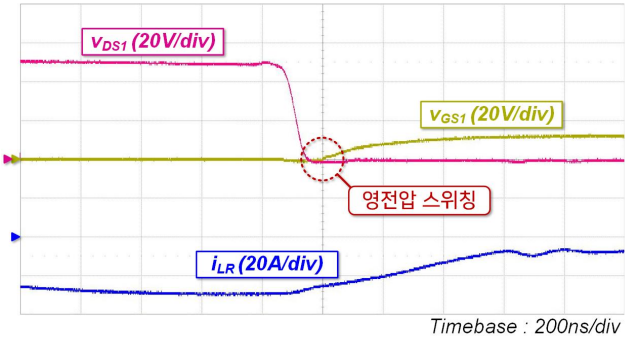


그림 6. 영전압 스위칭 실험 파형 (14V/200W 출력)

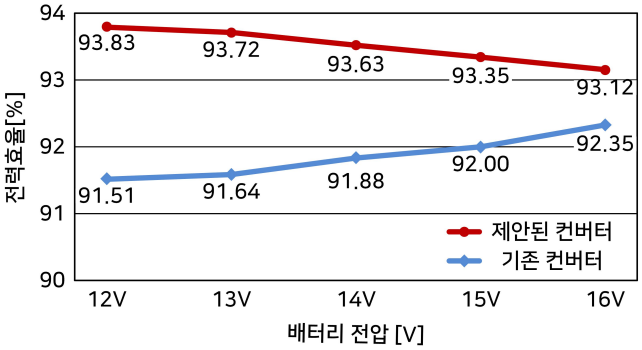


그림 7. 출력 전압에 따른 전력 효율 (200W 출력)

3. 실험 결과

3.1 실험설계 사양

기존 및 제안된 회로의 설계 사항은 표 1과 같다. 표에서 확인할 수 있듯이, 제안된 회로에는 기존 회로 대비 다이오드를 하나 덜 사용되는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 제안된 회로는 기존 회로 대비 부피를 저감시킬 수 있으며, 다이오드로 인한 도통 손실이 저감되는 이점이 있다.

또한 제안된 회로는 더 작은 부스트 인덕터를 갖는다. 그 이유는 제안된 회로의 결합 인덕터가 입력 전류 리플을 상쇄시키는 효과를 갖기 때문이다. 이를 통해서 제안된 회로는 기존 회로 대비 고밀도 특성을 가질 수 있다. 또한 비교적 적은 턴 수를 사용할 수 있기 때문에, 인덕터 권선에서 발생하는 도통 손실을 저감시킬 수 있다는 부가적인 이점을 갖는다.

3.2 실험파형 분석

그림 5(a), 5(b)는 각각 12V, 16V 출력 전압에서의 실험 파형이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 12V 대비 16V 출력에서 더 높은 시비율을 사용하는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 제안된 회로는 주파수 변경 없이, 시비율을 조정하여 전압 이득을 조절하는 토폴로지임을 확인할 수 있다.

그림 6은 제안된 회로의 영전압 스위칭을 보여준다. 기존 회로는 부스트 프리레귤레이터 단에서 스위치가 하드 스위칭 하여 큰 스위칭 손실이 발생한다. 하지만, 그림 6에서 볼 수 있듯이, 제안된 회로는 영전압 스위칭을 달성하기 때문에 스위칭 손실이 적다.

3.3 효율 비교

정리하면, 제안된 회로는 기존 회로 대비 낮은 다이오드 도통 손실 및 스위칭 손실을 갖는다. 부가적으로 인덕터의 권선 도통 손실이 저감되는 이점이 있다. 이를 통해서 제안된 회로는 기존 회로 대비 높은 효율을 갖는다.

그림 7에는 배터리 전압 상태에 따른 효율을 나타내었다. 연료전지는 200W로 정격운전 함을 가정한다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 제안된 회로는 12V-16V 배터리 전압의 전 구간에서 높은 효율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 부스트 프리레귤레이터가 통합된 고효율 고정-주파수 LLC 공진형 컨버터를 제안되었다. 태양광 및 연료전지 용 컨버터는 넓은 연속적인 전류, 넓은 전압 범위 요구조건을 달성해야 한다. 기존 2단-구조 컨버터는 이러한 요구조건을 만족시켜 태양광 및 연료전지에 사용되기 적합하다. 하지만, 기존 2단-구조 컨버터는 큰 스위칭 손실, 큰 다이오드 도통 손실로 인해 낮은 효율을 갖는 문제가 있다. 따라서 이를 해결하기 위해, 제안된 회로는 부스트 프리레귤레이터를 통합시킨 새로운 구조를 사용한다. 새로운 구조 및 제어 방법을 통해 다이오드를 소거하였고, 모든 스위치의 영전압 스위칭을 달성할 수 있었다. 따라서 제안된 회로는 기존 회로 대비 높은 효율을 갖는다.

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-에너지클라우드기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3F2A1072469)

참 고 문 헌

[1] D. Sha, Y. Xu, J. Zhang, and Y. Yan, "Current-Fed Hybrid Dual Active Bridge DC-DC Converter for a Fuel Cell Power Conditioning System With Reduced Input Current Ripple," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 64, no. 8, pp. 6628-6638, Aug. 2017.

[2] Q. Li, L. Xu, J. Wei, R. Ma, D. Zhao, and F. Gao, "An Improved Floating Interleaved Boost Converter With the Zero-Ripple Input Current for Fuel Cell Applications," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 34, no. 4, pp. 2168-2179, Aug. 2019.

[3] H. Seok, B. Han, B. Kwon, and M. Kim, "High Step-Up Resonant DC-DC Converter With Ripple-Free Input Current for Renewable Energy Systems," IEEE Trans. Industrial Electron., vol 65, no. 11, pp. 8543-8552, Nov. 2018

[4] J. Lee, Y. Jeong, and B. Han, "An Isolated DC/DC Converter Using High-Frequency Unregulated LLC Resonant Converter for Fuel Cell Applications," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2926-2934, Jul. 2011.