

낮은 입력 전압을 가지는 DC/DC 전원 장치의 도통 손실 감소를 위한 비대칭 하프-브리지 공진형 컨버터

정연호, 이재범, 문건우
한국과학기술원(KAIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 낮은 입력 전압을 가지는 DC/DC 전원장치의 도통 손실 감소를 위한 비대칭 하프-브리지 공진형 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터를 액티브 클램프 파워드 (ACF) 컨버터와 하프-브리지 (HB) LLC 공진형 컨버터의 스위치 통합 기법을 통해 생성되었다. ACF 컨버터를 LLC 공진형 컨버터 앞단에 위치시켜 HB LLC 공진형 컨버터에 증가된 전압을 인가함에 따라 변압기 턴비를 증가할 수 있고, 그에 따라 1차측 도통 손실을 감소시킬 수 있다. 이 때, 두 단에 적용된 스위치를 스위치 통합 기법을 통해 높은 전력 밀도 및 추가되는 도통 손실 감소를 통해 높은 효율을 동시에 이룰 수 있었다. 또한, 비대칭 펄스 폭 변조(APWM)를 제어해 입력 전압 범위를 감소시켜 효율에 최적화된 설계를 가능하게 하였다. 제안된 컨버터는 36-72V 입력 전압, 300W(12V/25A) 출력을 가진 프로토타입 컨버터를 통해 그 유효성을 입증하였다.

1. 서론

48V DC 배터리 시스템에 기초한 48V의 DC/DC 전원 시스템은 병렬 연결된 구조로 인해 높은 신뢰성 및 쉬운 유지 보수 등의 많은 장점을 갖는다^[1]. 또한, 48V DC 전력 시스템은 일반적으로 사용되는 AC 시스템과 비교해 하나의 전송 단을 제거 할 수 있기 때문에 높은 시스템 효율을 가진다^[2]. 이러한 장점으로 인해, 48V DC 시스템은 데이터 센터 및 통신 시스템들과 같은 다양한 응용 분야에서 널리 적용되고 있다.

48V DC 전원 장치에 많이 사용되는 기존의 하프-브리지(HB) LLC 공진형 컨버터의 경우, 간단한 구조와 넓은 영전압 스위칭 (ZVS) 능력, 그리고 낮은 2차측 전압 스트레스 등을 장점을 가진다. 하지만, 48V DC 전원 시스템에서 요구하는 넓은 입력 전압 범위(36-72V_{DC})요구에 만족하면서 효율이 가장 중요한 48V의 입력 전압(V_{nom})의 효율을 최적화 설계하는 것을 불가능하게 만든다. 또한, 낮은 입력 전압이 그대로 변압기에 인가되어 턴비의 증가를 제한하게 되고, 그로 인해 큰 1차측 도통 손실을 가지게 된다. 이를 개선하기 위해, DC/DC 단 앞에 부스트 컨버터를 직렬 연결한 두-스테이지 구조가 실질적으로 많이 사용되고 있다. 이러한 방식은 HB LLC 공진 컨버터의 입력되는 전압을 증가시켜 변압기에 인가되는 전압을 상승시키고, 그에 따라 변압기 턴비의 증가를 통해 1차측 도통 손실을 감소하여 높은 효율을 얻을 수 있다. 하지만, 추가된 front-end 부스트 컨버터에 의한 1) 높은 비용, 2) 낮은 전력 밀도, 그리고 3) 추가된 부스트 컨버터의 스위치에 의한 큰 도통 손실 등의 단점을 야기하게 된다.

본 논문에서는 앞서 언급한 단점들을 극복 하기 위한 비대칭 하프-브리지 공진형 컨버터(AHBRC)를 제안한다. 제안된 컨버터는 HB LLC 공진 컨버터와 액티브 클램프 파워드 (ACF) 컨버터의 스위치 통합을 통해, 추가되는 스위치 소자 없이 1차측 도통 손실을 크게 감소시켜 높은 효율을 달성할 수 있다. 또한, 비대칭 듀티의 적용으로 HB LLC 공진형 컨버터 단의 입력 전압 범위의 감소를 통해 V_{nom} 에서 최적화된 설계가 가능하도록 하였다. 끝으로 제안된 방법은 실험을 통해 그 유효성을 검증한다.

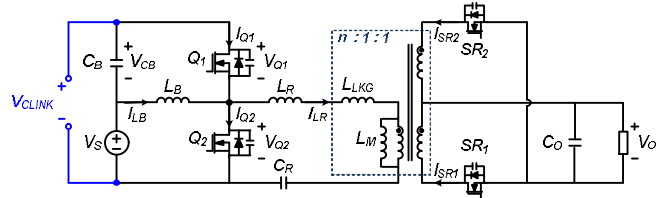


그림 1. 제안된 컨버터

2. 제안된 컨버터

제안된 컨버터는 ACF 회로를 기존 하프-브리지 LLC 공진형 컨버터에 통합하여 기존 두-스테이지 구조의 컨버터가 가지는 장점을 유지하면서 단점으로 지적된 낮은 전력 밀도 및 높은 비용의 문제를 해결하고자 하였다. 이번 장에서는 제안된 컨버터의 생성 원리, 기본 동작, 그리고 특징에 대해서 설명한다.

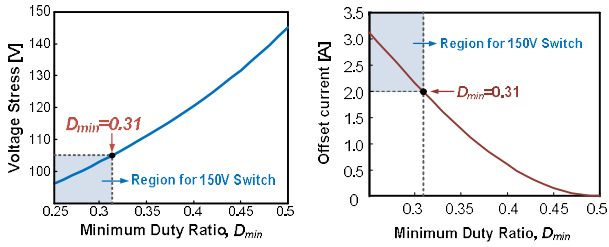
2.1 생성 원리 및 동작

ACF 회로의 추가되는 커패시터(C_B)에 적용된 V_{CB} 는 입력 전압(V_S)에 적용된 커패시터 구조를 가지고 있으며, V_S 와 V_{CB} 가 더해진 전압을 HB LLC 공진 컨버터 단의 입력에 연결한다. 즉, 두-스테이지 구조와 동일하게 높은 전압을 HB LLC 공진형 컨버터 단에 인가 가능하다. 이 때, ACF 컨버터와 HB LLC 공진 컨버터의 스위치는 모두 상호 보완적인 스위치 동작이 적용됨에 따라, 각 단에 적용된 두 개의 스위치는 공유 가능하다. 즉, 두 스위치를 병합하여, 그림 1의 제안된 컨버터를 생성 하였다. 이러한 스위치 통합 기법을 통해 제안된 컨버터는 기존 두-스테이지에 비해 부품 수를 감소시켜 높은 전력 밀도 및 가격 절감을 이룰 수 있다. 또한, 제안된 컨버터의 동작은 기존 ACF 컨버터와 HB LLC 공진형 컨버터 각각의 동작과 동일하다.

기존의 HB LLC 공진 컨버터에서는 출력 전압(V_O)은 대칭된 듀티비($D=0.5$)에 주파수를 조절하는 pulse frequency modulation(PFM) 제어를 적용하고 있다. 하지만, 기존과 동일한 대칭적인 듀티비가 적용될 경우, HB LLC 공진형 컨버터의 입력 전압의 범위는 여전히 넓으며, 이로 인해, 효율 최적화를 위한 컨버터의 설계는 한계점을 가지게 된다. 이러한 넓은 입력 전압 범위를 감소시키기 위해 제안된 컨버터는 기존 컨버터와 동일한 출력 전압 레귤레이션을 위한 PFM 제어에 입력 전압에 따른 비대칭(asymmetric) PWM(APWM) 제어가 추가 적용되었다^[4]. 이 때, 입력 전압의 변화에 따라 V_{CB} 는 백-부스트 전압 이득 식 $V_{CB}=DV_S/(1-D)$ 로 나타낼 수 있다. 이와 같이 입력 전압 변동에 따라 변화되는 V_{CB} 를 통해 HB LLC 공진형 컨버터에 적용되는 입력 전압 V_{CLINK} 를 보상하여 입력 전압 범위를 감소시킬 수 있다. 이처럼 감소된 입력 전압 범위로 인해 효율에 최적화된 설계가 가능하게 된다.

2.2 제안된 컨버터의 최소 듀티비 설계(D_{min})

제안된 컨버터는 앞서 설명한 것과 같이 HB LLC 컨버터의 입력 전압 범위를 감소시켜 효율에 최적화된 설계를 위해 APWM 제어를 적용한다. 제안된 컨버터에서 변압기의 오프셋 전류(I_{offset})과 1차측 스위치의 최대 전압 스트레스를 고려하여 APWM 제어의 범위를 최소 듀티(D_{min})을 통해 설정 한다.



(a) 최대 전압 스트레스 (b) 변압기 오프셋 전류
그림 2. 최소 듀티 설계 고려 사항

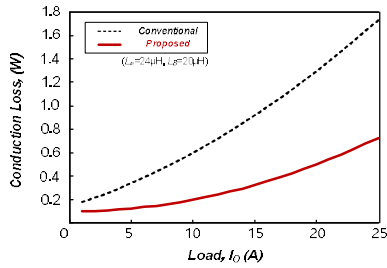


그림 3. 도통 손실의 비교

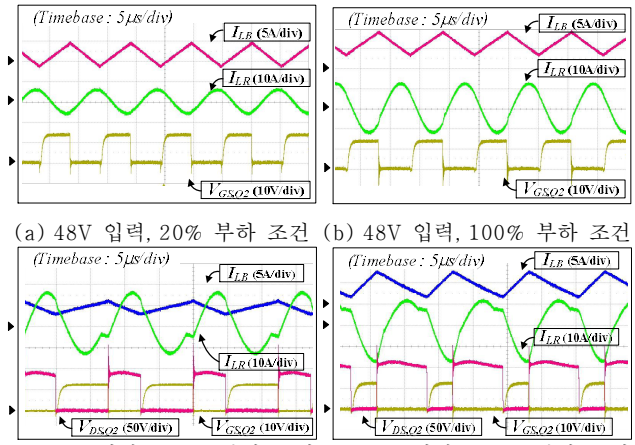
최대 전압 스트레스는 그림 2(a)와 같이 구할 수 있으며, 이는 D_{min} 에 비례한다. 즉, 비대칭 범위를 줄이기 위해 D_{min} 을 크게 설정할 경우, 전압 스트레스가 증가되어 더 높은 정격 전압의 스위치를 사용해야 하며, 정격 전압 크기에 비례하는 증가된 $R_{DS(ON)}$ 으로 인해 도통 손실이 증가되는 단점이 있다. 한편, APWM 제어는 변압기에 I_{offset} 가 발생시켜 변압기의 크기 및 도통 손실을 증가시키는 단점을 야기한다. 이는 설정되는 D_{min} 에 의해 그림 2(b)와 같이 반비례한다. 그러므로, 낮은 $R_{DS(ON)}$ 적용을 위해 설정된 150V의 스위치 내에서 변압기의 오프셋 전류가 최소가 되는 지점, 즉, D_{min} 을 0.31로 설계하였다.

2.3 제안된 컨버터의 손실 분석

낮은 입력 전압을 가지는 DC/DC 전원 시스템에 있어서, 도통 손실은 총 손실의 매우 큰 부분을 차지한다. 따라서, 효율은 스위치의 도통 손실의 비교를 통해 예측될 수 있다. 제안된 컨버터는 스위치 통합 기법을 통해 통합된 두 개의 스위치에 흐르는 전류로 인해 발생하는 도통 손실이 계산 된다. 한편, 기존 컨버터의 도통 손실은 부스트 컨버터의 한 개의 스위치와 다이오드, HB LLC 공진형 컨버터 단에서 두 개의 스위치에 흐르는 전류에 대한 도통 손실로 표현 된다. 기존의 컨버터는 제안된 컨버터보다 낮은 전압 스트레스로 인해 더 낮은 $R_{DS(ON)}$ 을 가진 스위치가 적용 가능하다. 하지만, 추가된 스위치와 다이오드로 인해 전체의 도통 손실을 오히려 증가하게 된다. 반면, 제안된 컨버터에서 큰 $R_{DS(ON)}$ 이 적용되지만, 스위치 병합 기술을 통해 추가 스위치에서 발생하는 도통 손실을 제거함으로써 전체 도통 손실을 그림 3과 같이 크게 감소시킬 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 컨버터는 36-72V_{DC} 입력, 12V/25A 출력을 가진 DC/DC 300W의 서버용 전원 공급장치의 프로토타입을 제작하여 실험적으로 그 유효성을 검증하였다. 그림 4(a)와 (b)는 48V 정격 입력 전압에서 20%, 100% 부하 조건에서의 실험 파형을 보여준다. 효율이 중요한 V_{nom} 에서 효율의 최적화를 위해 대칭적인 듀티



(a) 48V 입력, 20% 부하 조건 (b) 48V 입력, 100% 부하 조건
(c) 36V 입력, 100% 부하 조건 (d) 72V 입력, 100% 부하 조건
그림 4. 제안된 컨버터의 주요 동작 파형

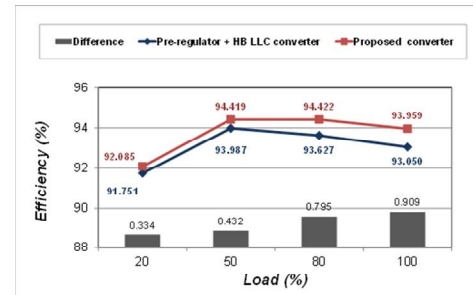


그림 5. 측정 효율 비교 그래프

및 공진 주파수를 스위칭 주파수로 설정하여 동작하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)와 (d)는 최소 및 최대 입력 전압에서 비대칭 듀티로 동작하는 파형을 각각 제시하였다. 특히, 그림 4(d)에서는 설계된 D_{min} 인 0.31로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 기존의 컨버터와의 효율 비교를 나타낸 그래프이다. 제안된 컨버터는 1차측 도통 손실을 크게 감소시켜 전체 부하 조건에서 높은 효율을 달성하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 새로운 비대칭 하프-브리지 공진형 컨버터를 제안하였고, 제안된 컨버터가 큰 도통 손실 및 높은 단가를 가지는 기존 방식의 단점을 개선하는 것을 실험을 통해 증명하였다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] S. Luo and I. Batarseh, "A review of distributed power systems Part I: DC distributed power system," IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 20, no. 8, pp. 5-16, Aug. 2005.
- [2] M. Murrill and B. J. Sonnenberg, "Evaluating the Opportunity for DC Power in the Data Center." Emerson Network Power White Paper (2011).
- [3] A. Acik, and I. Cadirci, "Active clamped ZVS forward converter with soft-switched synchronous rectifier for high efficiency, low output voltage applications.", in Proc. IEE Electr.: Power Appl., vol. 150, no. 2, pp. 165-175, Mar., 2003.
- [4] P. K. Jain, A. Martin, and G. Edwards, "Asymmetrical pulse-width modulated resonant DC/DC converter topologies," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, no. 3, pp. 413-422, May 1996.