

스위칭 손실을 저감한 고주파 인터리브드 토탈폴 브리지리스 부스트 PFC 컨버터

박무현, 이영달, 문건우
KAIST

High Frequency Interleaved Totem-pole Bridgeless Boost PFC Converter with Reduced Switching Losses

Moo Hyun Park, Young Dal Lee, and Gun Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 스위칭 손실을 저감한 고주파 인터리브드 토탈폴 브리지리스 부스트 PFC 컨버터를 제안한다. 인터리브드 토탈폴 브리지리스 부스트 PFC 컨버터는 하드 스위칭 동작을 하기 때문에 큰 스위칭 손실을 가지며, 고주파에서의 동작이 제한된다. 제안하는 컨버터는 수동 소자인 인덕터가 추가된 구조이며, 추가 인덕터의 에너지를 이용해 영전압 스위칭을 할 수 있다. 그 결과, 스위칭 손실이 저감되고 고주파 동작이 가능해진다. 또한 기존에 설계된 회로와 제어단을 그대로 유지할 수 있다.

1. 서론

최근 온실 가스 감축을 위해 자동차 연비 규제가 강화되고 있으며, 전기 자동차에 대한 수요가 증가하고 있다. 여러 전기 자동차 중에서도 플러그인 하이브리드 차량이 가장 높은 상용화 가능성을 가지고 있어, 그에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 플러그인 하이브리드 차량은, 차량 내부에 탑재형 충전기(on board charger, OBC)를 가진다. OBC는 차량의 높은 연비를 위해 고효율을 가져야 하며, 공간이 제한적인 차량 엔진룸에 탑재되기에 고밀도가 요구된다.

OBC는 PFC단과 DC/DC단으로 이루어지며, PFC단에 적합한 토폴로지 중 하나는 인터리브드 토탈폴 브리지리스 부스트 PFC 컨버터이다^[1]. 브리지 다이오드가 없고 인터리브드 구조를 가지기 때문에, 작은 도통 손실과 작은 부피의 EMI 필터단을 가진다. 일반적으로 컨버터의 고밀도화를 위해서는 고주파 스위칭을 적용하여 자성체 부피를 저감하지만 PFC단은 하드 스위칭을 하기 때문에, 고주파 스위칭을 할 경우 큰 스위칭 손실이 발생한다. 특히 스위칭 손실의 증가는 스위치 방열 시스템의 증가에 영향을 미치므로, 스위칭 손실을 저감할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 회로에 수동소자만을 추가하여 스위칭 손실을 저감할 수 있는 회로를 제안한다. 이 회로는 스위칭에서 발생하는 스위칭 손실을 저감하여 고주파 스위칭을 달성할 수 있으며, 기존의 회로보다 더 높은 효율을 가진다. 제안하는 회로의 성능은 3.3kW(450V/7.33A) 프로토타입을 통해 검증되었다.

2. 제안하는 회로

2.1 제안하는 회로의 구조

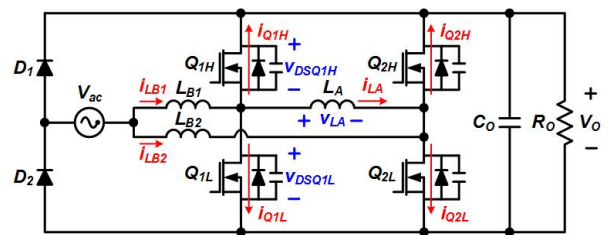


그림 1 제안하는 회로

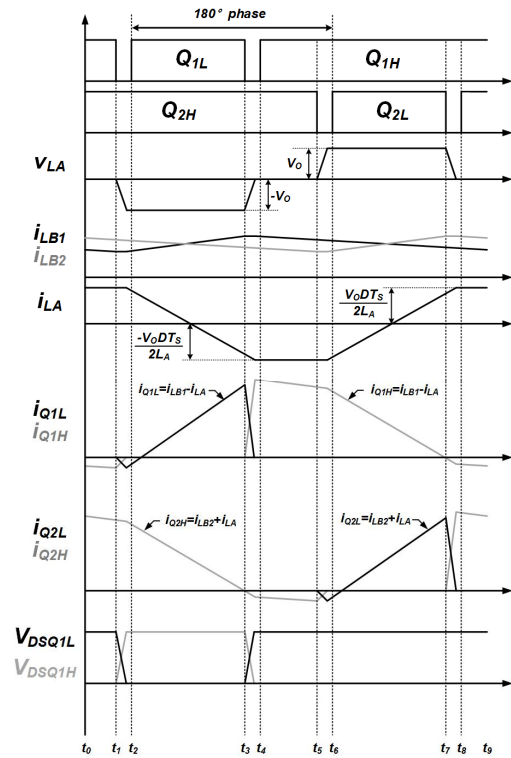


그림 2 제안하는 회로의 주요 동작 파형

제안하는 회로는 기존의 인터리브드 토탈폴 브리지리스 부스트 PFC에 인덕터가 추가된 구조로, 그림 1. 에 나타내었다. 두 개의 단일 PFC는 서로 동일한 소자들로 구성되어 있으며, 180°의 위상이 차이를 가지며 동작한다.

2.2 회로 동작

제안하는 회로의 구조와 동작은 대칭적이기 때문에, 양의 입력 전압이 인가된 경우로 분석하며 그에 따라, D_1 에는 전류가 흐르지 않으며, D_2 만 도통된다. 부스트 인덕터 L_{B1} , L_{B2} 에 흐르는 전류 i_{LB1} , i_{LB2} 는 각각 Q_{1L} 과 Q_{2L} 이 켜진 경우 v_{ac}/L_B 의 기울기로 증가하며, Q_{1H} 와 Q_{2H} 가 켜진 경우에는 $(v_{ac} V_O)/L_B$ 의 기울기로 감소한다. 추가 인덕터 L_A 에는 도통 되는 스위치에 따라 V_O , 0 , V_O 가 인가되며, L_A 에 흐르는 전류 i_{LA} 는 스위칭 주기 T 와 시비율 D 로 동작할 때, $V_O DT/2L_A$ 와 $V_O DT/2L_A$ 를 반복한다.

Q_{1L} 과 Q_{1H} 에 흐르는 전류는 i_{LB1} i_{LA} 이고, Q_{2L} 과 Q_{2H} 에 흐르는 전류는 $i_{LB2}+i_{LA}$ 이다. Q_{1L} 과 Q_{2L} 이 켜지기 전에 각 스위치에 흐르는 전류가 음의 값을 가지며 스위치의 바디 다이오드를 통해 흐르기 때문에, 영전압 스위칭이 달성된다. 또한 Q_{1H} 와 Q_{2H} 에 흐르는 전류는 영전류 스위칭으로 꺼지므로 바디 다이오드의 리버스 리커버리를 감소시킬 수 있다.

2.3 영전압 스위칭 조건

영전압 스위칭을 하기 위해서는 스위치가 켜지기 전에 출력 커패시터가 모두 방전되어야 한다. L_A 의 에너지를 이용하여 방전하는 것이므로 다음과 같은 수식을 만족하여야 한다.

$$\frac{1}{2}L_A i_{LA}(t_1)^2 - \frac{1}{2}L_{B1} i_{LB1}(t_1)^2 > C_{oss} V_O^2 \quad (1)$$

따라서 i_{LB1} 이 작은 구간에서는 쉽게 영전압 스위칭을 할 수 있지만, i_{LB1} 이 큰 구간에서는 영전압 스위칭이 되지 않는다. L_A 의 값을 작게 하면 i_{LA} 가 커져 더 넓은 구간에서 영전압 스위칭을 하여 스위칭 손실을 줄일 수 있지만, RMS 전류가 커져 도통 손실이 증가하게 된다. 따라서 손실 분석을 통해 최대의 효율을 얻을 수 있는 L_A 값이 선정되었다.

3. 실험결과

제안된 회로의 성능을 검증하기 위해 3.3kW(450V, 7.33A) 출력을 갖는 컨버터가 제작되었다. 표 1은 동작 특성 및 주요 구성 요소이다.

표 1 회로의 동작 특성 및 주요 구성 요소

입력 전압	220Vac
스위칭 주파수	300kHz
부스트 인덕터(LB1, LB2)	PQ3230 (75uH)
스위치	GS66508T (650V, 30A, 50mΩ)
추가 인덕터(LA)	PQ35I (37uH)

그림 3은 제안하는 컨버터의 동작 파형이고 그림 4는 확대된 파형이다. i_{LB1} 과 i_{LB2} 는 180° 의 위상차를 가지고 동작하며 그에 따라 i_{LA} 가 0을 중심으로 증감을 반복한다. 또한 그림 5에서 스위치의 기생 커패시터의 전압이 모두 방전된 이후에 켜지는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라 스위칭 손실이 저감되고, 그림 6에서 제안하는 컨버터의 효율이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 100% 부하에서 기존의 컨버터는 스위치의 온도가 매우 높아져 특성이 저하되어 효율이 급격히 낮아지는 반면, 제안하는 컨버터는 96.71%의 효율을 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 스위칭 손실을 저감한 인터리브드 토렘폴 브리지리스 부스트 PFC가 제안되었다. 제안하는 컨버터는 추가

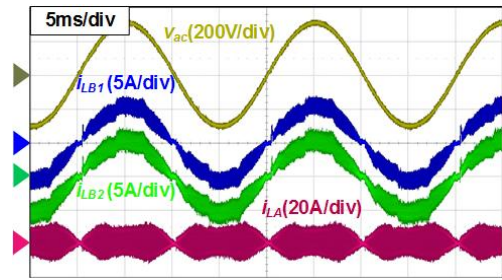


그림 3 제안하는 컨버터의 동작 파형

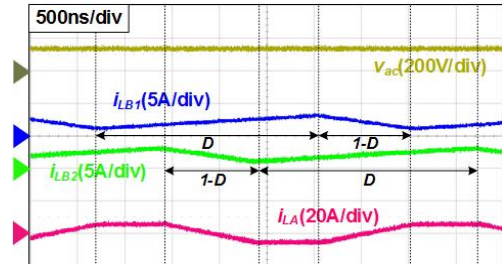


그림 4 확대된 동작 파형

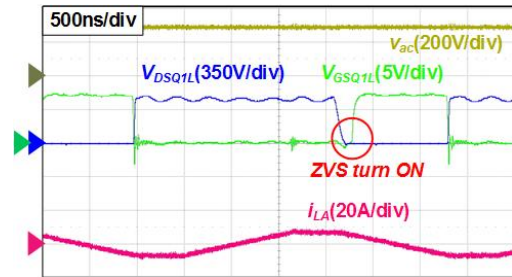


그림 5 제안하는 컨버터의 스위칭 동작

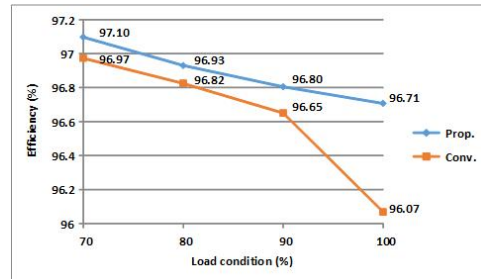


그림 6 제안하는 컨버터와 기존 컨버터의 측정 효율

인덕터의 에너지를 이용하여 영전압 스위칭을 하며, 스위칭 손실을 저감하여 높은 효율을 달성하였다. 또한, 추가적인 제어나 능동소자를 필요로 하지 않기에 제안하는 컨버터는 OBC와 같이 고효율 고밀도를 요구하는 어플리케이션에 널리 이용될 수 있을 것이다.

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF 2016R1A2B2010328)

참고 문헌

- [1] S. Bin and L. Zhengyu "An Interleaved totem pole boost bridgeless rectifier with reduced reverse recovery problems for power factor correction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1406 1415, Jun. 2010.