

공진 기법을 이용한 고효율 하프-브리지 제타 컨버터

백재일¹, 이재범², 문건우¹
KAIST¹, 한국철도기술연구원²

High Efficiency Half-Bridge ZETA Converter with Resonant Technique

Jae Il Baek¹, Jae Bum Lee², Gun Woo Moon¹
KAIST¹, KRRI²

ABSTRACT

하프 브리지 제타 컨버터는 간단한 구조와 넓은 영전압 스위칭 영역으로 인해 low to medium 용량 어플리케이션에 적합한 컨버터이다. 하지만 1,2차측의 큰 첨두 전류로 인해 큰 스위칭 턴 오프 손실과 역회복 손실 문제를 가지며, 이는 하프 브리지 제타 컨버터의 고효율 획득을 어렵게 만든다. 본 논문에서는 하프 브리지 제타 컨버터의 동작을 분석하고 이를 통해 1,2차측 첨두 전류를 효과적으로 줄일 수 있는 방법에 대해 제안한다. 제안된 컨버터의 효과는 300 400V 입력전압과 56V/250W 출력을 갖는 prototype의 실험을 통해 검증된다.

1. 서 론

그림1에서 볼 수 있는 기존의 비대칭 하프 브리지 컨버터는 간단한 제어와 구조, 영전압 스위칭 능력, 그리고 1차측의 낮은 전압 스트레스로 인해 low to medium 용량 어플리케이션에 적합한 토폴로지이다. 하지만 넓은 입력 전압 범위를 갖는 조건에서 비대칭 하프 브리지 컨버터는 nominal 입력 동작에서 다음의 문제를 갖는다. 1) 비대칭 동작으로 인해 트랜스포머의 자화인덕터 전류에 큰 dc offset을 발생시켜 트랜스포머의 사이즈를 증가시키며, 1차측 Q_1 스위치의 영전압 스위칭 능력을 약화시킨다. 2) 2차측 다이오드 D_{S2} 에 큰 전압 스트레스를 가진다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다.

하프 브리지 제타 컨버터는 추가되는 소자 없이 효과적으로 비대칭 하프 브리지 컨버터의 문제를 해결할 수 있다는 장점을 갖는다. 그림 2는 하프 브리지 제타 컨버터의 회로를 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 하프 브리지 제타 컨버터는 비대칭 하프 브리지 컨버터와 유사한 구조를 갖지만 하나의 2차측 다이오드 대신 큰 커패시터를 갖는 blocking 커패시터 C_S 를 사용한다. 따라서 하프 브리지 제타 컨버터는 일정한 전압을 갖는 C_S 덕분에 높은 전압 이득과 0.5이상의 최대 동작 시비율을 가질 수 있다. 이는 하프 브리지 제타 컨버터의 트랜스포머 턴비를 증가시켜 자화인덕터의 dc offset 전류와 2차측 다이오드의 전압 스트레스를 감소시킨다. 또한, 그림 3에서 볼 수 있듯이 Q_2 스위치의 ON기간 동안 1차측 전류가 감소해 큰 음의 전류를 가질 수 있기 때문에 Q_1 스위치의 넓은 영전압 범위를 획득할 수 있다. 따라서, 하프 브리지 제타 컨버터는 비대칭 하프 브리지에 비해 높은 효율을 달성할 수 있다.^{[1] [2]}

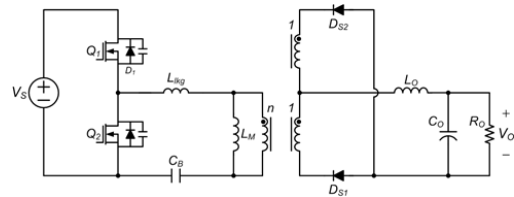


그림 1. 비대칭 하프-브리지의 회로.

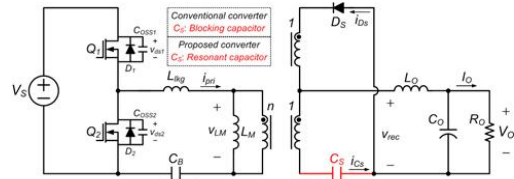


그림 2. 하프-브리지 제타 컨버터의 회로.

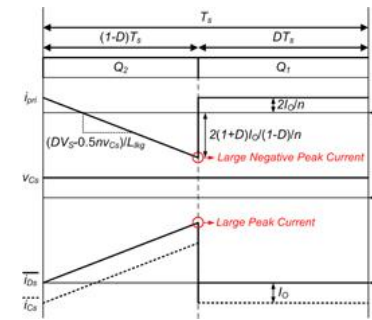


그림 3. 기존 하프-브리지 제타 컨버터의 간략화된 주요 파형.

하지만 하프 브리지 제타 컨버터는 그림3에서 확인 할 수 있듯이 1,2차측의 큰 첨두전류로 인해 다음과 같은 문제점을 갖는다. 1) 1차측 큰 첨두전류로 인해 Q_2 스위치의 큰 턴 오프 스위칭 손실을 갖는다. 2) 2차측 큰 첨두 전류로 인해 다이오드 D_S 에 큰 역회복 손실을 갖는다. 3) 큰 1,2차측 RMS 전류를 갖는다. 따라서 하프 브리지 제타 컨버터는 이러한 문제점들로 인해 더 높은 효율을 갖기 어렵다.

본 논문에서는 하프 브리지 제타 컨버터의 큰 첨두 전류 문제를 해결하기 위해 공진기법을 적용한 하프 브리지 제타 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 그림 2에서 볼 수 있듯이 2차측 blocking 커패시터 C_S 와 1차측 공진 인덕터 L_{lk} (트랜스포머 누설 인덕터와 외부 인덕터의 합)의 공진을 통해 사인형태의 1,2차측 전류 모양을 만든다. 따라서 제안된 컨버터는 1,2차측 첨두 전류를 감소시켜 추가적인 소자 없이 효과적으로 하프 브리지 제타 컨버터의 효율을 향상시킬 수 있다.

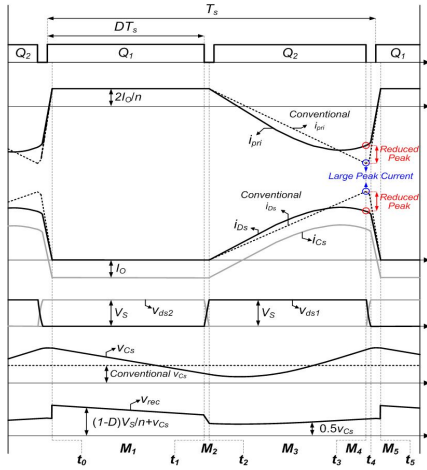


그림 4. 제안된 컨버터의 동작 파형.

2. 제안된 컨버터의 동작 분석

이번 장에서는 동작 분석을 통해 제안된 컨버터의 특징에 대해서 확인한다. 제안된 컨버터의 동작 분석을 위해 다음의 조건이 가정된다. 1) 한 스위칭 주기 동안 출력 전압/전류는 일정하다. 2) 자화 인덕터와 출력 인덕터의 리플 전류는 없다. 3) 1차측 blocking capacitor는 DV_S 의 전압 소스이다 4) 회로에 표시되지 않은 소자들의 기생성분들은 무시된다. 하프 브리지 제타 컨버터의 스위칭 한 주기 동작은 5가지 모드로 나뉘며, 그림4는 제안된 컨버터의 동작 파형을 나타낸다.

Mode1[t_0-t_1] D_S 가 꺼지고, 1차측에서 전달된 파워가 C_S 를 통해서 전달된다. 따라서 출력 인덕터에 C_S 의 전압이 인가되며, C_S 전압의 양(+)의 리플로 인해 제안된 컨버터는 제안된 컨버터에 비해 더 높은 전압 이득을 갖는다.

Mode2[t_1-t_2] Q_1 이 꺼지면서 Q_2 의 영전압 스위칭 동작이 이루어지며, 자화 인덕터와 출력 인덕터에 저장된 큰 에너지로 쉽게 영전압 스위칭이 달성된다.

Mode3[t_2-t_3] L_{lk} 와 C_S 의 공진을 통해 입력에서 출력으로 파워가 전달되며 이때 L_{lk} 와 D_S 에 흐르는 전류는 다음의 수식과 같다.

$$i_{pri}(t) = \frac{2I_O}{n} + \left[\frac{nv_{Cs}(t_2)}{2} - DV_S \right] \frac{\sin(w_R(t-t_2))}{Z_R}, \quad (1)$$

$$i_{Ds}(t) = -0.5n i_{pri}(t) + I_O \quad (2)$$

n 은 트랜스포머 턴비, $w_R = n/(2\sqrt{L_{lk}C_S})$, $Z_R = 2\sqrt{L_{lk}}/(n\sqrt{C_S})$.

따라서 그림4에서 확인 할 수 있듯이, i_{pri} 와 i_{Ds} 가 사인 형태의 전류 모양을 가져, 기존 하프 브리지 제타 컨버터에 비해 t_3 시점에서 작은 값을 가진다. 이로 인해 제안된 컨버터는 턴 오프 스위칭 손실 및 역회복 손실을 감소시킬 수 있다.

Mode4[t_3-t_4] L_{lk} 에 저장된 에너지로 Q_1 의 영전압 스위칭 동작이 이루어진다. 따라서 t_3 시점에서의 제안된 컨버터의 감소된 1차측 전류는 영전압 스위칭 조건을 악화시킬 수 있다. 하지만 제안된 컨버터는 큰 전압 이득으로 L_{lk} 를 증가시킬 수 있어 감소된 전류로 인한 영전압 스위칭 조건을 보상할 수 있다.

Mode5[t_4-t_5] C_S 전압의 절반이 출력 인덕터에 인가되기 때문에 제안된 컨버터는 freewheeling 없이 파워를 전달할 수 있다.

3. 실험결과

제안된 컨버터의 유효성은 300 400V 입력 전압과 56V/250W 출력 전류, 100kHz 스위칭 주파수를 갖는 실험조건에서 검증되었다. 컨버터에 사용된 소자는 표 1과 같다.

표 1. 실험에 사용 된 소자.

Components	Conventional	Proposed
1차측 스위치	IPP60R385CP	
2차측 다이오드	MBR40250T	
변압기(PQ2625)	$N_p:N_s:N_s = 28:5:5$ $L_M : 878\mu H, L_{lk}:3.1\mu H$	
추가 인덕터 (RM6)	$L_{Ext} = 14.5\mu H, 11turns$	$L_{Ext} = 18.9\mu H, 14turns$
2차측 커패시터, C_S	10 μF	2 μF

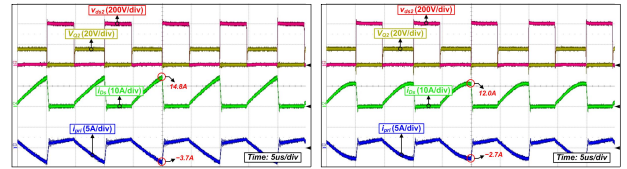


그림 5. 100% 부하 조건에서 주요 실험파형.

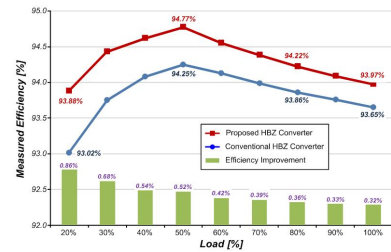


그림 6. 측정된 효율.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 기존 컨버터의 1,2차측 전류가 삼각형 형태를 가지는 것에 반해 제안된 컨버터는 L_{lk} 와 C_S 의 공진을 통해 사인 형태의 1,2차측 전류를 갖는다. 따라서 Q_2 가 꺼지는 시점에서의 전류를 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 증가된 L_{lk} 를 통해 20% 부하까지 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 이로 인해 그림6에서 볼 수 있듯이 제안된 컨버터는 전 부하에서 기존 하프 브리지 제타 컨버터에 비해 높은 효율을 달성 할 수 있다.

4. 결론

제안된 컨버터는 하프 브리지 제타 컨버터의 구성 요소인 L_{lk} 와 C_S 의 공진 관계를 이용하여 추가 소자 없이 1,2차측 첨두 전류를 줄일 수 있다. 따라서 제안된 컨버터는 턴 오프 스위칭 손실 및 역회복 손실을 줄여 기존 컨버터의 효율을 개선할 수 있다. 이러한 특성으로 인해, 제안된 컨버터는 고주파수 조건에서 더 큰 효과를 가질 수 있다.

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

참고 문헌

- J. B. Lee, K. B. Park, C. H. Yu, H. S. Youn, and G. W. Moon, "A New Center Tapped Half Bridge Zeta Converter with Small Transformer DC Offset Current and Low Voltage Stress." *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 6593-6603, Dec. 2015.
- J. I. Baek, J. K. Kim, J. B. Lee, H. S. Youn, and G. W. Moon, "Integrated Asymmetrical Half Bridge Zeta(AHBZ) Converter for DC/DC Stage of LED Driver with Wide Output Voltage range and Low Output Current." *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7489-7498, Dec. 2015.