

# 낮은 입력 전류 리플을 갖는 연료 전지용 고효율 공진형 PWM 컨버터

이민수, 최승현, 최동민, 방지훈, 문건우  
KAIST 전기 및 전자공학부

## High Efficiency PWM Resonant Converter with Near-Zero-Ripple Input Current for Fuel Cell Applications

Minsu Lee, Sungmoon Cheon Dongmin Choi, Gun-Woo Moon  
School of Electrical Engineering, KAIST

### ABSTRACT

본 논문에서는 연료 전지를 위한 새로운 공진형 펄스 폭 변조(PWM) 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 기존 연구들에서 나타나는 입력 전류 리플을 유발하는 두가지 요인을 해결하여 입력 전류 리플을 크게 감소시킨다. 또한 리플 개선 과정에서 1차측 스위치의 영진압 스위칭을 달성하며 인덕터의 손실 또한 개선한다. 결론적으로, 제안하는 컨버터는 1% 미만의 낮은 입력 전류 리플과, 최대 97%의 최고 효율을 달성한다. 회로의 효율성을 증명하기 위해 35-45V 입력과 380V 출력을 갖는 600W 연료 전지용 컨버터의 프로토타입을 제작하여 실험이 진행되었다.

### 1. 서론

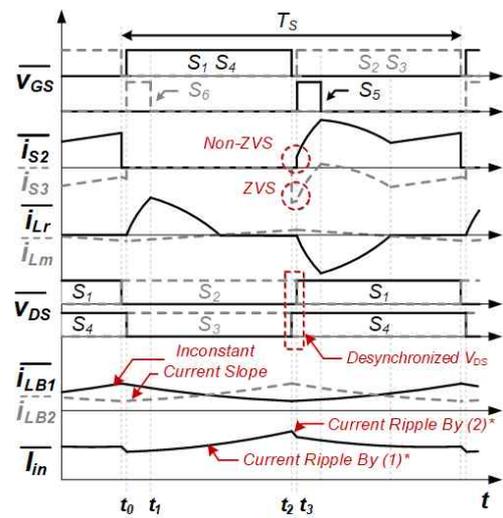
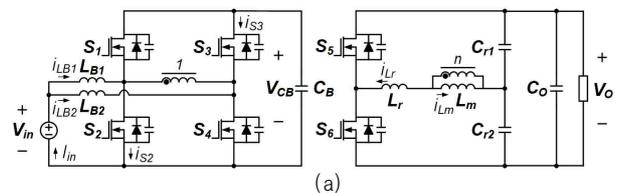
최근 무분별한 환경 오염과 화석 연료의 고갈을 막기 위해 태양광, 풍력, 연료 전지와 같은 신재생 에너지원에 대한 관심이 전세계적으로 증가하고 있다. 그 중 연료 전지는 친환경적이고 공간 효율적인 저장 장치로서 철도, 차량, 마이크로그리드 등을 포함한 수많은 산업 분야에서 연구가 진행되고 있다.

그러나 연료 전지는 여전히 낮고 불안정한 출력 전압을 제공하며, 부하 전류의 변동에 따라 내구성이 매우 낮아지고 구동 효율 또한 크게 감소한다. 따라서 연료 전지의 출력에 연결된 컨버터는 연료 전지의 구동 효율을 높이고, 내구성을 유지하기 위해 매우 낮은 입력 전류  $I_{in}$  리플을 가져야 한다.<sup>[1]</sup>

따라서, 최근에는 낮은  $I_{in}$  리플을 구현하기 위해 그림 1과 같은 인터리브드 부스트 인덕터가 통합된(IBC) PWM 공진형 컨버터에 2차측 동기 정류기(SR) 변조를 적용한 회로들이 제안되었다.<sup>[2]-[3]</sup> 이들은 이상적인 조건에서 두 부스트 인덕터의 전류가 완전히 상쇄되며 0에 가까운 리플(NZR)의  $I_{in}$ 을 달성할 수 있다.

하지만, 기존 회로들<sup>[2]-[3]</sup>에서는 (1) 인덕터의 톨오프 및 허용 오차에 의한  $I_{in}$  리플과 (2) 테드 타임 동안 드레인-소스 전압  $v_{DS}$ 의 천이가 비동기화되어 발생하는  $I_{in}$  리플과 같은 두 가지 리플 발생 요인이 간과되었으며, 이들에 의해 무시할 수 없는  $I_{in}$  리플이 발생한다. 따라서 이들은 NZR의  $I_{in}$ 을 달성하는데 한계점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이전 연구들에서 발생하는  $I_{in}$  리플의 문제점들을 해결하며, 효율 측면으로도 추가적인 장점을 갖는 새로운 공진형 PWM 컨버터를 제안한다.



\* (1) Ripple due to the roll-off and tolerance of inductance  
(2) Ripple due to the desynchronized  $v_{DS}$  transition

그림 1 기존 IBC 공진형 PWM 컨버터<sup>[2]-[3]</sup> (a) 회로 구조 (b) 동작 파형

### 2. 제안하는 공진형 PWM 컨버터

그림 2는 제안하는 NZR 공진형 PWM 컨버터의 회로와 동작 파형이다. 제안하는 회로는 기존의 공진형 PWM 컨버터 구조의 변압기 1차측을 절반으로 나누어 센터탭으로 구성하고, 하나의 부스트 인덕터와 입력단을 연결하는 커런트 패드 푸시풀이 통합된(CFPPI) 구조를 띄고 있으며<sup>[4]</sup>, 2차측 SR에는 새로운 변조 기법을 적용한다. 결과적으로 이를 통하여 제안하는 컨버터는 기존의 연구들에서 발생하는 입력 전류 리플을 크게 개선할 수 있다.

#### 2.1 비동기화된 $v_{DS}$ 전환에 의한 $I_{in}$ 리플 개선

기존의 IBC 공진형 PWM 컨버터는 부스트 인덕터의 전류가 1

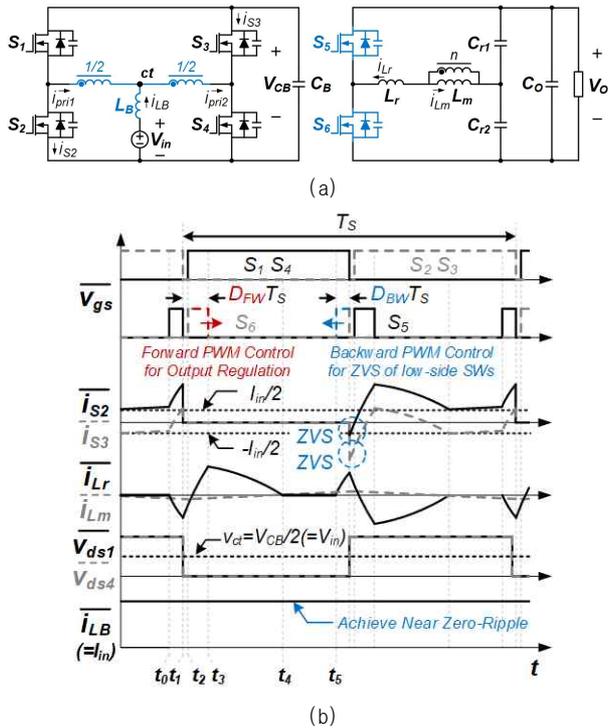


그림 2 제안하는 컨버터 (a) 회로 구조 (b) 동작 파형

차측 스위치를 통해 흐르며, 상단 스위치의 ZVS를 달성을 돕지만, 하단 스위치에서는 하드 스위칭을 발생시킨다. 따라서 상단 스위치들은 데드 타임이 시작할 때  $v_{DS}$ 가 천이되지만, 하단 스위치들은 데드 타임이 끝날 때  $v_{DS}$ 가 천이된다. 이러한  $v_{DS}$  천이 시간의 비동기화는 데드 타임 동안 인덕터 전류를 동시에 감소시키며, 입력 전류의 큰 리플을 발생시킨다.

한편 제안하는 회로는 그림 2(b)와 같은 새로운 SR 변조를 적용하여, 모든 1차측 스위치들의 ZVS를 달성한다. 따라서 모든 1차측 스위치들은 데드 타임이 시작할 때  $v_{DS}$ 가 천이되며, 기존 회로들에서 데드 타임 동안 발생하는 전류 리플을 크게 감소시킨다. 또한 모든 1차측 스위치들의 ZVS 달성으로 스위칭 손실이 저감되고 효율 또한 개선된다.

## 2.2 인덕터의 톨오프 및 허용오차에 의한 $I_m$ 리플 개선

기존의 IBI 공진형 PWM 컨버터에 적용된 두 인덕터 코어들은 이상적인 상황에서 동일한 인덕턴스로 설계되며, 이때만 두 리플이 서로 완벽히 상쇄된다. 하지만 실제 인덕터 코어는 순시 전류에 따라 투자율의 변동이 발생하며, 순시 전류가 증가할수록 인덕턴스가 감소하는 톨오프 현상이 발생한다.<sup>[5]</sup> 또한 인덕터의 허용 오차에 의해서도 그 인덕턴스의 차이가 발생한다. 이러한 인덕턴스 차이는 각 부스트 인덕터에 흐르는 전류

표 1 각 프로토타입의 설계된 소자 값

	기존 IBI 공진형 PWM 컨버터 <sup>[2]-[3]</sup>	기존 CFPPi 공진형 PWM 컨버터 <sup>[4]</sup>	제안하는 NZR 컨버터
입출력 스펙	Input: 35-45 V, Output: 385 V, Switching Frequency 50 kHz		
전력 스위치	IPP051N15N5 [×4 ea] ( 150 V, 120 A, $R_{ds,on}$ =5.1 mΩ )		
부스트 인덕터	CH330060 [×2 ea] ( 63.5 μH / 61.2 μH )	CH236125 ( 31.8 μH )	
변압기	PQ4040 (730 μH, 12:22)	PQ4040 (730 μH, 6.6:22)	
SR 스위치	UJ4C075060K3S [×2 ea] ( 750 V, 28 A, $R_{ds,on}$ = 58 mΩ )		
공진 소자	$L_r$ : PQ2625 (33.5 μH, 16 turns) / $C_{r1}, C_{r2}$ : 147 nF [×2 ea]		

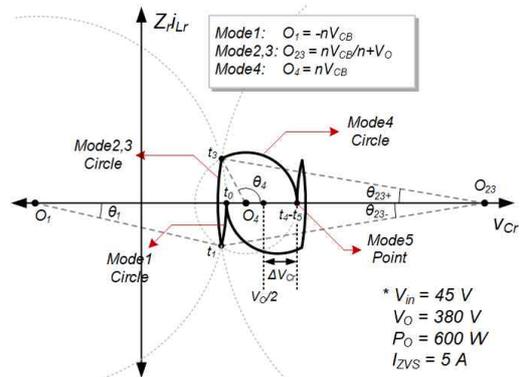


그림 3 제안하는 컨버터의 상태 평면 궤적(SPT)

의 기울기의 차이로 반영되며, 이들을 서로 완전히 상쇄되지 못하고  $I_m$  리플을 발생시킨다.

제안하는 회로는 이러한 문제를 1차측의 구조의 변경을 통하여 개선한다. 제안하는 컨버터의 1차측 스위치들은 모두 0.5의 고정 시비율로 동작하며, ZVS를 달성한다. 따라서 변압기 양단에는 항상  $V_{CB}$  또는  $-V_{CB}$ 의 전압이 인가되고, 그 센터탭 노드에는 항상 일정한  $V_{CB}/2$ 가 인가된다. 결과적으로 정상 상태에서 부스트 인덕터에 0에 가까운 전압이 지속적으로 인가되기에, 인덕터의 리플이 발생하지 않고, NZR의  $I_m$ 를 달성할 수 있다. 따라서 인덕터의 톨오프와 허용오차에 의한  $I_m$  리플은 제안하는 회로에서는 발생하지 않는다.

## 2.3 ZVS 전류와 역방향 듀티비 $D_{BW}$

제안하는 컨버터는 출력을 조절하기 위한 순방향 듀티  $D_{FW}$  이외에도  $D_{BW}$ 가 SR에 추가로 인가된다. 이는 그림 2(b)에서 보인바와 같이 상단 스위치  $S_6, S_5$ 의 ZVS를 위한 충분한 전류를 형성해주며, 이를 조절하여 제안하는 컨버터는  $S_6, S_5$ 의 충분한 ZVS 전류  $I_{ZVS}$ 를 보장한다. 이는 그림 3과 같은 공진 동작의 상태 평면 궤적(SPT)을 기하학적으로 분석하여 얻을 수 있으며,  $I_{ZVS}$ 는 다음과 같이 표현됩니다.

$$D_{BW} = \frac{1}{\omega_r T_s} \sin^{-1} \left( \frac{Z_r (I_{ZVS} + I_m / 2)}{n(0.5V_o + nV_{CB} - (I_o T_s / 2C_r))} \right) \quad (1)$$

이때,  $\omega_r$ 은 각주파수,  $T_s$ 는 스위칭 주기,  $V_{CB}$ 는 CB의 전압이다.

(1)의 모든 변수는 입력력 및 공진 파라미터로 설계된 사양이다. 따라서 제안하는 컨버터는 입력력 센싱 값을 기반으로  $D_{BW}$ 를 제어할 수 있으며,  $D_{BW}$ 를 조정하여 전체 부하 조건에서 원하는  $I_{ZVS}$ 를 형성하여 ZVS를 달성할 수 있다.

## 3. 실험 결과

회로의 효율성을 검증하기 위해 35-45V 입력과 380V 출력

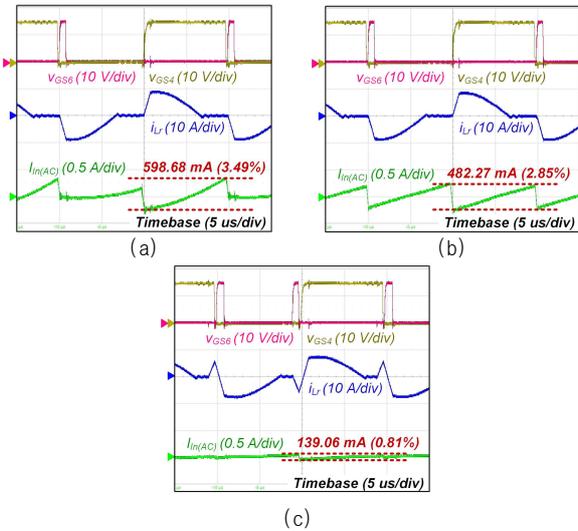


그림 4 프로토타입들의 동작 파형 (45 V<sub>in</sub>, 600 W) (a) 기존 IBI 컨버터<sup>[2]-[3]</sup> (b) 기존 CFPPI 공진형 PWM 컨버터<sup>[4]</sup> (c) 제안하는 컨버터

을 갖는 600W 연료 전지용 컨버터의 프로토타입을 제작하여 실험이 진행되었다. 각 프로토타입은 표 1의 소자를 통하여 제작되었으며, 이를 통해 입력 전류 리플과 효율이 측정되었다. 그림. 4는 기존 컨버터와 제안하는 컨버터의 실험 파형이다.

그림 4(a)와 같이, 기존 IBI PWMR 컨버터<sup>[2]-[3]</sup>는 인덕터의 롤오프와 허용 오차로 인해 전류 리플이 발생한다. 이는 제안하는 회로의 1차측과 같은 CFPPI 구조<sup>[4]</sup>를 적용함으로써 그림 4(b)에서 개선된다. 하지만 데드 타임 동안 비동기화된  $v_{DS}$  천이에 의한 전류 리플이 여전히 발생한다. 이는 논문의 새로운 SR 제어를 적용하여, 이 또한 그림 4(c)와 같이 크게 개선된다. 그 결과, 그림 5에서 보이는 바와 같이, 제안하는 회로는 기존 컨버터들에 비해  $I_{in}$  리플을 크게 감소시키며, 전체 부하 조건에서 1% 미만의 매우 낮은  $I_{in}$  리플을 달성한다.

그림 6은 전체 부하 조건에서 측정된 효율이다. 제안하는 컨버터는 그림 7에서 보이는 바와 같이 1차측 스위치들의 ZVS를 달성할 수 있으며, 부스트 인덕터에서 발생하는 손실 또한 크게 개선한다. 따라서 모든 동작 범위에서 상대적인 고효율을 달성할 수 있으며, 최대 97%의 최고 효율을 달성한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 낮은 입력 전류 리플과 고효율을 달성하는 새로운 공진형 PWM 컨버터를 제안한다. 제안하는 회로는 개선된 1차측 구조와 새로운 SR 변조를 통하여 기존 연구들에서 발생하는 입력 전류 리플의 발생 원인을 개선한다. 따라서 제안하는 회로는 1% 미만의 매우 낮은 입력 전류 리플을 가질 뿐만 아니라, 1차측 스위치들의 ZVS 달성과 인덕터 손실 개선을 통하여 전체 동작 범위에서 최고 효율 또한 달성할 수 있다. 따라서 제안하는 회로는 연료 전지용 컨버터를 위한 새로운 토폴로지로서 적합한 선택지가 될 것이다.

이 성과는 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021R1A5A1031868)

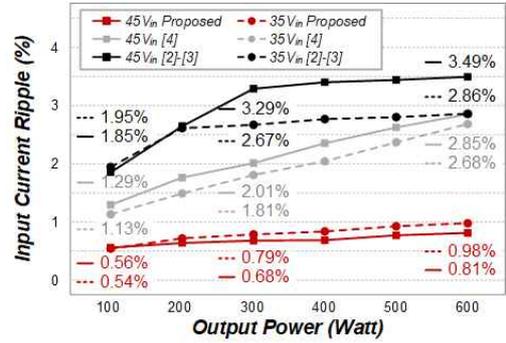


그림 5 컨버터 프로토타입들의 측정된  $I_{in}$  리플 결과

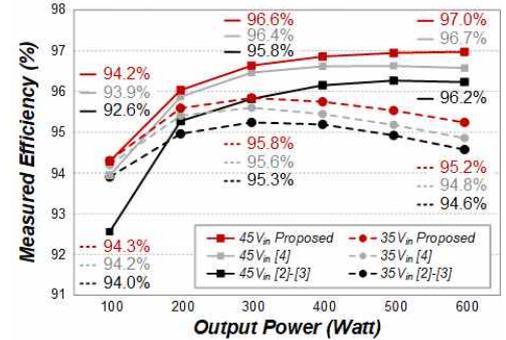


그림 6 컨버터 프로토타입들의 측정된 효율 결과

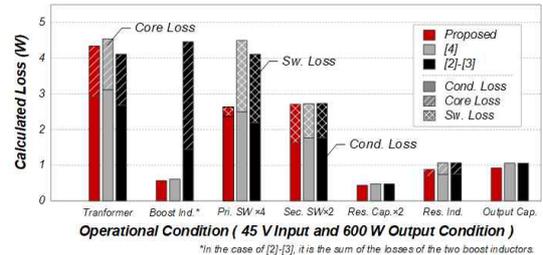


그림 7 컨버터 프로토타입들의 손실 분석 (45 V<sub>in</sub>, 600 W)

#### 참고 문헌

- [1] S. K. Mazumder, R. K. Burra, and K. Acharya, "A ripple-mitigating and energy-efficient fuel cell power-conditioning system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1437-1452, Jul. 2007.
- [2] H. Seok, B. Han, B. H. Kwon, and M. Kim, "High step-up resonant DC-DC converter with ripple-free input current for renewable energy systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 11, pp. 8543-8552, Nov. 2018.
- [3] L. Gu, X. Zhang, and P. Li, "Hybrid-PWM-Controlled Current-Fed Bidirectional Series Resonant Converter With Low Current Ripple and Wide Voltage Gain," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 8, pp. 7125-7136, Aug. 2021.
- [4] J. W. Lim, J. Hassan, and M. Kim, "Bidirectional soft switching push-pull resonant converter over wide range of battery voltages," IEEE Trans. Power Electron., vol. 36, no. 11, pp. 12251-12267, Nov. 2021.
- [5] M. Dadić, M. Jurčević, and R. Malarić, "Approximation of the nonlinear B-H Curve by complex exponential series," IEEE Access, Vol. 8, pp. 49610-49616, Mar. 2020.