

LLC 공진형 컨버터의 전류 센서리스 동기정류기 제어 기법

장원용, 김이삭, 정현우, 박정욱
연세대학교

Sensorless Synchronous Rectification Scheme for LLC Resonant Converter without Current Sensor

Won-Yong Jang, Issac Kim, Hyeonwoo Jung, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 효율, 전력밀도 및 안정성 개선을 위한 전류 센서리스 동기정류기 제어 기법을 제안한다. 제안하는 동기정류기 제어 기법은 기존 방법들과 달리 출력 전류 센서 없이 구현할 수 있어 전력밀도를 개선할 수 있다. 또한, 기존 방법들보다 더 정확한 분석 방법 및 제어 전략을 사용하여 기존 방법보다 높은 효율 및 안정성을 보장할 수 있다. 즉, 제안하는 동기정류기 제어 방법은 전류 센서 없이 최대 97.4%의 효율을 달성한다. 제안하는 방법의 타당성을 검증하고자 1.5kW의 연구실 프로토타입을 통해 실험을 진행한다.

1. 서 론

LLC 공진형 컨버터는 기존의 단방향 절연형 컨버터 중 하나인 PSFB 컨버터보다 고효율을 위한 zero-voltage switching (ZVS) 동작이 쉽고 넓은 출력 전압 영역을 다룰 수 있는 장점으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 따라서, 이는 전기차 급속 충전기, 전력공급 장치 및 light emitting diode (LED) 드라이버 등 많은 산업 분야에서 사용되고 있다^[1].

앞서 기술했던 것처럼 LLC 공진형 컨버터는 높은 효율을 달성할 수 있으나, 2차 측의 도통 손실을 저감하는 것은 추가적인 효율을 개선할 수 있는 과제 중 하나이다. 따라서, 이를 해결하기 위해 동기정류기 제어 기법이 흔히 사용되고 있다. 동기 정류기 제어는 이론적으로 2차 측 전류가 흐를 때 2차 측 스위치를 키고, 흐르지 않을 때 끄는 제어를 의미한다. 하지만, 실제 하드웨어 구동 시에는 정확하게 2차 측 스위치를 제어하는 것은 불가능하며, 어떻게 스위치를 키고 끄는 지에 따라 회로의 안정성 및 효율의 차이가 존재하게 된다. 따라서, 보다 더 높은 안정성 및 효율을 달성하기 위해 동기정류기 제어 방법에 대한 많은 연구가 진행되었다^[2].

기존에 연구되었던 동기정류기 방법은 크게 전류 센싱 방법, 전압 센싱 방법, 그리고 센서리스 방법이 존재한다. 이 중 전류 센싱 방법과 전압 센싱 방법은 LLC 공진형 컨버터 외 별도의 추가회로가 필요하기 때문에 전력밀도 측면에서 좋지 못하다는 문제점이 존재한다. 반면, 센서리스 방법은 추가적인 회로 없이 출력 전압 센서와 같이 기존 제어에 사용되는 센서들을 이용하기 때문에 전력밀도를 개선할 수 있다는 장점으로 상당히 많은 연구가 진행되었다^{[3],[4]}. 하지만, LLC 공진형 컨버터에서 사용되는 기존의 센서리스 동기정류기 제어 방법들은 넓은 부하에서

정확하지 않은 수식적 분석을 사용할 뿐 아니라 잘못된 동기정류기 제어 전략을 사용하기 때문에 효율 및 안정성이 저하되는 문제점이 존재한다. 또한, 기존의 방법들은 넓은 부하에서 적용하기 위해 출력 전류 센서가 요구되는데, 이는 출력 전류 센서가 설치되지 않는 어플리케이션에서는 추가적인 설치가 요구된다. 즉, 기존의 센서리스 동기정류기 제어 방법은 전력밀도, 효율 및 안정성이 좋지 못하다는 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 효율, 전력밀도 및 안정성 개선을 위한 전류 센서리스 동기정류기 제어 기법을 제안한다. 제안하는 동기정류기 제어 기법은 기존 센서리스 동기정류기 제어 방법과 달리 출력 전류 센서 없이 구현할 수 있어 전력밀도를 개선할 수 있다. 또한, 기존보다 더 정확한 분석 방법 및 제어 전략을 사용하여 높은 효율 및 안정성을 보장할 수 있다. 즉, 제안하는 동기정류기 제어 기법은 기존 센서리스 동기정류기 제어 방법보다 더 개선된 전력밀도, 효율 및 안정성을 달성할 수 있다. 제안하는 방법의 타당성을 검증하고자 1.5kW의 연구실 프로토타입을 통해 실험을 진행한다.

2. 본 론

2.1 LLC 공진형 컨버터의 파형 분석

LLC 공진형 컨버터의 토폴로지는 그림 1과 같다. LLC 공진형 컨버터는 크게 1차 측 스위치를 의미하는 S_1-S_4 , 2차 측 스위치를 의미하는 S_5-S_8 , 그리고 공진탱크로 구성된다. 또한 공진탱크는 공진 인덕터를 의미하는 L_1 , 공진 커패시터를 의미하는 C_1 , 그리고 $n:1$ 의 턴수비로 결정된 변압기의 자화 인덕터를 의미하는 L_{mag} 로 구성된다.

일반적으로, LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수를 변조하여

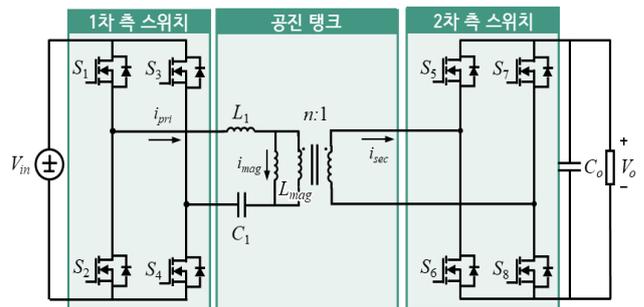


그림 1. LLC 공진형 컨버터의 토폴로지.
Fig. 1. Circuit of LLC resonant converter.

출력 전압을 조절하는 pulse-frequency modulation (PFM) 제어 기법을 사용한다. 즉, 해당 제어 기법을 통해 공진 탱크의 임피던스 특성을 변경하여 출력 전압을 조절한다. 이에 따라 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 큰 동작을 의미하는 강압 영역, 스위칭 주파수가 공진 주파수와 동일한 단일 이득 영역, 그리고 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 작은 승압 영역으로 나뉜다. 따라서, 각 영역에 따라 동기정류기 제어 기법이 다르게 동작되어야 하며, 각 영역에 따른 파형 분석은 필수적임을 의미한다.

LLC 공진형 컨버터의 동작 파형은 스위칭 주기, T_s 를 기준으로 양의 반주기 및 음의 반주기로 나뉘게 되며, 이 때 각 반주기끼리 대칭성을 갖기 때문에 본 논문에서는 양의 반주기만 분석하도록 한다. 또한, 데드타임은 스위칭 주기에 비해 상당히 작은 구간을 차지하기 때문에 본 논문에서는 무시하여 분석한다. 게다가, 단일 이득 영역의 동기 정류기 제어 전략은 2차 측 스위치가 1차 측 스위치와 동일하게 동작하면 되는 간단한 방법이기에 때문에, 해당 영역의 분석은 제외하도록 한다.

2.1.1 강압 영역의 파형 분석

LLC 공진형 컨버터의 강압 영역에 대한 파형은 그림 2에 나타난다.

모드 1 [t_0-t_1]: 해당 모드가 시작할 때 S_1 및 S_4 가 켜지게 된다. 이 때 전력은 2차 측의 전류를 의미하는 i_{sec} 가 음의 방향으로 부하에 전달된다. 즉, 해당 구간에서 양의 반주기임에도 불구하고 S_6 및 S_7 이 켜지게 된다.

모드 2 [t_1-t_2]: 해당 모드는 1차 측 전류를 의미하는 i_{pri} 가 1차 측 자화 전류를 의미하는 i_{mag} 보다 큰 값을 가질 때 시작하게 된다. 해당 모드가 시작하는 순간인 t_1 때 S_6 과 S_7 이 꺼지고, S_5 와 S_8 은 동시에 켜지게 된다. 즉, i_{sec} 가 양의 방향으로 부하에 전력을 전달하며, 이는 음의 반주기의 모드 1까지 지속된다.

즉, 강압 영역에서 동기정류기 제어 전략은 2차 측 스위치를 의미하는 S_6 및 S_7 이 1차 측 스위치를 의미하는 S_1 및 S_4 에 비해, 모드 1의 구간을 의미하는 T_{delay} 만큼 딜레이 되어야 함을 의미한다.

2.1.2 승압 영역의 파형 분석

LLC 공진형 컨버터의 승압 영역에 대한 파형은 그림 3에 나타난다.

모드 3 [t_0-t_1]: 해당 모드가 시작하는 t_0 때 S_1 , S_4 , S_6 및 S_8 가 동시에 켜지게 된다. 이 때 전력은 양의 방향으로 부하에 전달되며, 이는 모드 2와 동일한 방식으로 동작하기 때문이다.

모드 4 [t_1-t_2]: 해당 모드는 i_{pri} 가 i_{mag} 와 같은 값을 가질 때 동작한다. 이는 승압 영역에서 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 작기 때문에 발생한다. 해당 모드가 시작하는 순간인 t_1 때 S_6 와 S_8 이 꺼지고, 2차 측 스위치는 모두 켜지게 된다. 즉, 2차 측으로 전력이 전달되지 않고 1차 측의 공진 탱크에서의 공진이 발생한다.

즉, 승압 영역에서 동기정류기 제어 전략은 2차 측 스위치를 의미하는 S_6 및 S_8 이 1차 측 스위치를 의미하는 S_1 및 S_4 보다 모드 4의 구간을 의미하는 T_{off} 만큼 일찍 턴오프 되어야 함을 의미한다.

2.2 제안하는 동기정류기 제어 기법

본 논문에서 제안하는 동기정류기 제어 기법은 2.1 절에서 제

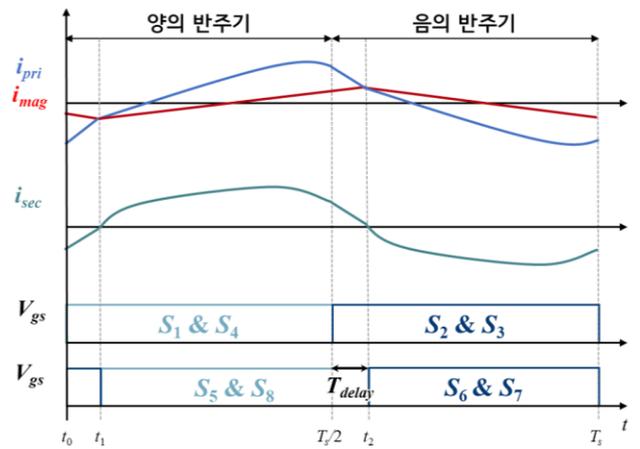


그림 2. LLC 공진형 컨버터의 강압 영역에 대한 파형.
Fig. 2. Waveforms of LLC Resonant converter for step-down region.

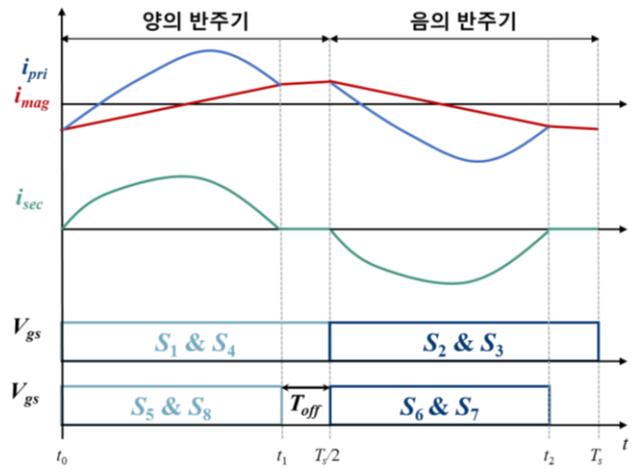


그림 3. LLC 공진형 컨버터의 승압 영역에 대한 파형.
Fig. 3. Waveforms of LLC Resonant converter for step-up region.

시된 전략을 토대로 동작한다. 또한, 동기정류기 제어는 제어 전략뿐만 아니라 수식적 분석 또한 상당히 중요하다. 하지만, 기존의 방법들^{[3], [4]}은 기본과 근사 분석 방법을 토대로 분석하기 때문에 스위칭 주파수가 공진 주파수에서 멀어질수록 정확도가 낮아지는 한계점이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 FHA 분석 방법보다 넓은 스위칭 주파수 영역에서 높은 정확도를 달성할 수 있는 시간 영역 분석 방법을 이용한다.

시간 영역 분석 방법을 이용하기 위해 먼저 각 모드 별 LLC 공진 탱크의 등가 회로에 키르히호프의 전압 법칙과 인덕터 및 커패시터의 방정식을 이용한다. 이에 따라 공진 커패시터 전압에 대한 2차 미분 방정식을 표현할 수 있고 일반해를 구할 수 있다. 또한 해당 결과값을 토대로 1차 측의 전류를 의미하는 i_{pri} 를 계산할 수 있다. 동시에 공진 탱크의 출력 전압에 인가되는 전압을 이용하여 i_{mag} 에 대해 구할 수 있다. 하지만, 정확한 T_{delay} 및 T_{off} 를 수식적으로 구하기 위해 앞서 미분 방정식을 통해 도출된 미지수에 대한 값을 얻어야 한다. 해당 미지수를 얻기 위해 동일한 개수의 방정식이 요구되며, 이는 LLC 공진형 컨버터 파형의 특징인 1) 대칭성 2) 연속성 3) 모드 전환 특성을 이용하면 미지수와 방정식의 개수가 같아 미지수 값을 구할 수 있다. 즉, 제안하는 동기정류기 제어 기법은 시간 영역 분

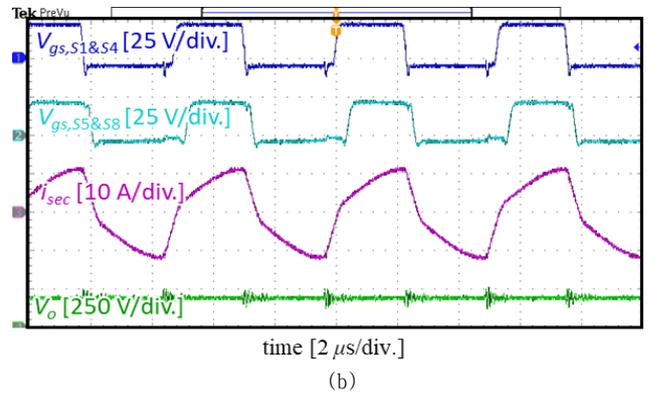
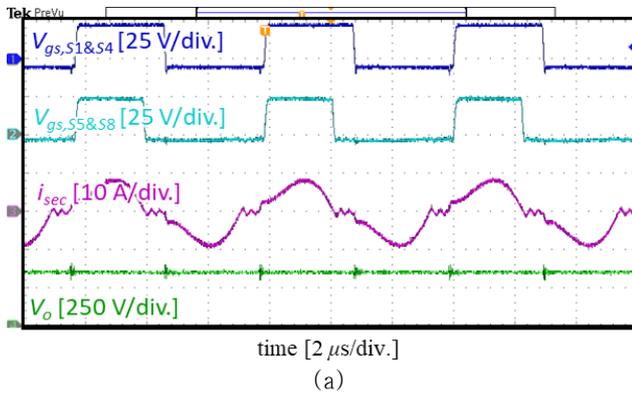


그림 4. 제안하는 동기정류기 제어 기법에 대한 영역 별 실험 파형. (a) 승압 영역. (b) 강압 영역.

Fig. 4. Experimental waveforms of proposed synchronous rectification method for each region. (a) step-up region. (b) step-down region.

석 방법을 통해 출력 전류 센서 없이 넓은 스위칭 영역에서 T_{delay} 및 T_{off} 를 정확하게 계산할 수 있다.

3. 실험 결과

제안하는 동기정류기 제어 기법을 검증하기 위해 300V 입력, 200–350V 출력, 100kHz 공진 주파수를 갖는 1.5kW의 연구실 프로토타입을 통해 실험을 진행하였다. 그림 4(a)는 정격 부하에서 강압 영역에서 제안하는 동기정류기 제어 기법의 실험 파형을 나타낸다. 해당 그림에서 확인할 수 있듯이, 2.1.1 절에서 기술한 것처럼 강압 영역에서 2차 측 스위치가 1차 측 스위치에 비해 계산된 T_{delay} 만큼 딜레이 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제안하는 동기정류기 제어 기법은 강압 영역에서 출력 전류 센서 없이 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 승압 영역에서 제안하는 동기정류기 제어 기법의 유효성을 검증하고자 정격 부하에서 실험을 진행하였으며, 이에 대한 실험 파형은 그림 4(b)에 나타낸다. 해당 그림에서 확인할 수 있듯이 승압 영역에서 2차 측 스위치가 1차 측 스위치에 비해 시간 영역 분석 방법에서 계산된 T_{off} 만큼 일찍 턴오프 된다. 즉, 제안하는 동기정류기 제어 기법은 승압 영역에서도 출력 전류 센서 없이 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로, 제안하는 방법과 기존의 방법 효율을 비교하였으며, 이는 그림 7에 나타내었다. 제안하는 동기정류기 제어 기법은 모든 부하조건 및 모든 출력 전압 영역에서 기존의 방법보다 높은 효율을 달성할 수 있다.

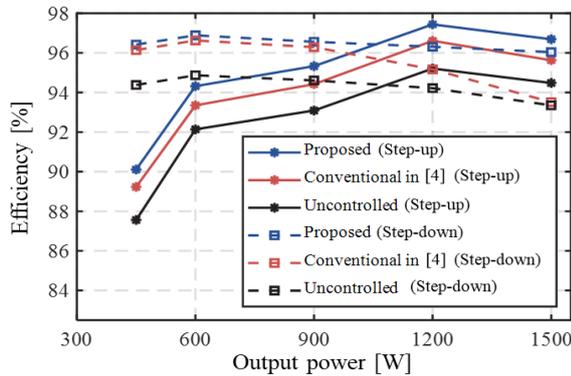


그림 5. 각 제어 기법 별 효율.

Fig. 5. Efficiencies for each control method.

4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 효율, 전력밀도 및 안정성 개선할 수 있는 전류 센서리스 동기정류기 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 동기정류기 제어 기법은 아래와 같은 장점이 존재한다.

- 기존의 방법과 달리 출력 전류 센서를 요구하지 않아 보다 더 높은 전력밀도 달성이 가능함.
- 시간 영역 분석 방법 및 올바른 제어 전략을 사용함으로써 보다 더 높은 효율 및 안정성 달성이 가능함.

제안하는 동기정류기 제어 기법을 검증하기 위해 1.5kW의 연구실 프로토타입을 통해 실험하였다. 제안하는 방법은 출력 전류 센서 없이 기존의 방법보다 더 높은 안정성을 가지며 동작하는 것을 확인하였다. 또한, 제안하는 방법은 기존의 방법보다 높은 효율을 달성하는 것을 확인하였다. 따라서, 제안하는 동기정류기 제어 기법은 LLC 공진형 컨버터의 고효율 및 고전력밀도가 요구되는 산업 어플리케이션에서 매우 유용한 선택지가 될 것이다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

참고 문헌

- [1] H. Wang, S. Dusmez and A. Khaligh, "Maximum Efficiency Point Tracking Technique for \$LLC\$-Based PEV Chargers Through Variable DC Link Control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 6041–6049, Nov. 2014.
- [2] Y. Wei, Q. Luo and H. A. Mantooth, "Synchronous Rectification for LLC Resonant Converter: An Overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 6, pp. 7264–7280, June 2021.
- [3] X. Zhu et al., "A Sensorless Model-Based Digital Driving Scheme for Synchronous Rectification in 1-kV Input 1-MHz GaN LLC Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 7, pp. 8359–8369, July 2021.
- [4] H. Li et al., "An Impedance-Based Digital Synchronous Rectifier Driving Scheme for Bidirectional High-Voltage SiC LLC Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 11, pp. 11314–11323, Nov. 2022.