

출력 전압 부스팅 및 정류가 가능한 준공진형 플라이백 컨버터

임경섭¹⁾, 김위민¹⁾, 조영균²⁾, 이상원¹⁾
 공주대학교¹⁾, 충남대학교²⁾

A Quasi-resonant Fly-buck Converter with Output Voltage Boosting and Regulation Capability

Gyeongseop Lim¹⁾, Wimin Kim¹⁾, Yungkun Cho²⁾, Sangwon Lee¹⁾
 Kongju National University¹⁾, Chungnam National University²⁾

ABSTRACT

플라이백 컨버터는 다중 출력 플라이백 컨버터와 달리 추가적인 권선이나 절연 소자 없이 1차측 제어가 가능하다. 그러나 해당 컨버터의 2차측 출력 전압은 1차측 출력 전압과 변압기의 권선비만으로 결정되기 때문에 전압 정류가 정확하지 못하다는 단점이 존재한다. 또한 2차측에 높은 출력 전압이 요구될 경우 높은 권선비에 따른 전력 밀도 저하가 발생하며, 부하 변동에 따른 교차 조절(cross-regulation)의 문제점을 갖는다.

본 논문은 플라이백 컨버터의 2차측에 스위치와 커패시터를 추가한 새로운 구조의 플라이백 컨버터를 제안하였다. 제안하는 구조는 누설 인덕턴스의 공진 및 스위칭을 활용한 2차측 출력 전압을 제어할 통해 교차 조절을 제거할 수 있으며, 승압 동작을 통해 트랜스포머의 권선비를 낮출 수 있다.

1. 서론

여러 산업용 어플리케이션에서 비용 및 에너지 효율적이며 정확한 정류 성능을 충족시키는 다중 출력 컨버터가 요구되고 있다. SIMO(Single Inductor Multi Output) 컨버터는 단일 인덕터의 에너지를 다중 출력으로 분기시켜 전달하는 회로이며, 적은 수의 부품으로 다양한 출력 전압을 얻을 수 있어 가장 널리 사용된다. 하지만 SIMO 컨버터는 출력 간 자기 결합으로 인해 모든 출력에 정확한 정류를 수행할 수 없는 교차 조절(cross-regulation) 문제를 갖고 있으며, 대부분의 경우 하나의 출력만이 페루프 제어되어 정류가 수행된다.

어플리케이션에 따라 입출력 절연이 요구될 경우, 변압기 및 SIMO 컨버터의 동작원리를 활용한 다중 출력 플라이백 컨버터가 사용될 수 있다. 하지만 해당 회로는 절연측 전압을 센싱하기 위하여 고가의 광커플러 혹은 추가적인 권선이 필요하며, 1차측 누설 인덕턴스에 의한 전압 스파이크 해소를 위한 스너버 회로가 요구된다. 이는 회로 전체의 비용 상승 및 효율 저감의 문제를 발생시킨다.

위의 단점을 개선시키기 위하여 그림 1과 같은 플라이백 컨버터가 제시되었다^[1]. 1차측의 동기식 벡 컨버터와 2차측의 플라이백 구조가 결합된 형태를

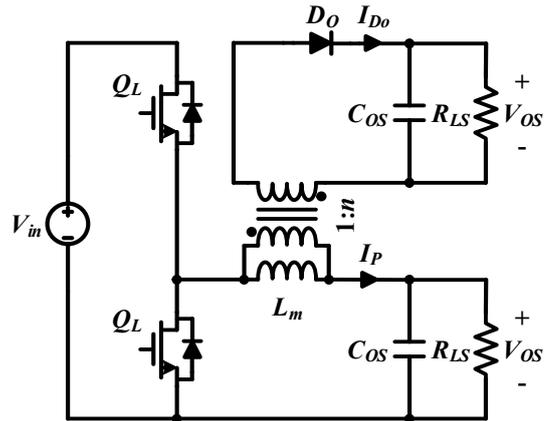


그림 1. 플라이백 컨버터.
 Fig. 1. Fly-buck converter.

가지며, 1차측 출력 전압 및 결합 인덕터 권선비에 따라 2차측 출력 전압이 결정된다. 해당 회로는 결합 인덕터(coupled inductor)를 통해 쉽게 다중 출력을 만들 수 있으며, 피드백 센싱을 위한 신호 절연이 필요하지 않기 때문에 상대적으로 비용 효율적인 특성을 갖는다. 또한 정확하게 제어된 비절연 출력과 반(半)제어된 절연 출력을 각기 다른 부하로 공급할 수 있다. 하지만 해당 회로는 절연측 출력 전압이 반-제어되기 때문에 출력 전압 정류가 정확하지 못하다는 단점이 존재하며, 비절연측은 강압 동작만을 하기 때문에 절연측에 비절연측 보다 큰 전압이 요구될 경우, 높은 권선비가 필요하게 된다. 더불어, 절연측의 부하 변동에 따른 교차 조절 현상 또한 발생한다. 이를 해결하기 위해 [2]에서 절연측 출력 다이오드와 보조 스위치를 직렬로 연결한 구조가 소개되었다. 하지만 이 방법은 교차 조절로 인하여 절연측 출력 전압이 커질 때에만 적용이 된다는 한계점을 갖고 있다.

본 논문은 2차측에 추가한 보조 요소를 통해 비절연측 출력 전압의 정확한 정류 및 승압이 가능한 구조를 제안한다. 보조 요소는 커패시터와 MOSFET 스위치로 구성되며, (이하 공진 커패시터 및 공진 스위치라 칭함) 공진스위치 제어를 통해 공진 커패시터와 누설 인덕터 간의 공진을 조절하여, 2차측 출력 전압 정류 동작 및 승압을 수행한다.

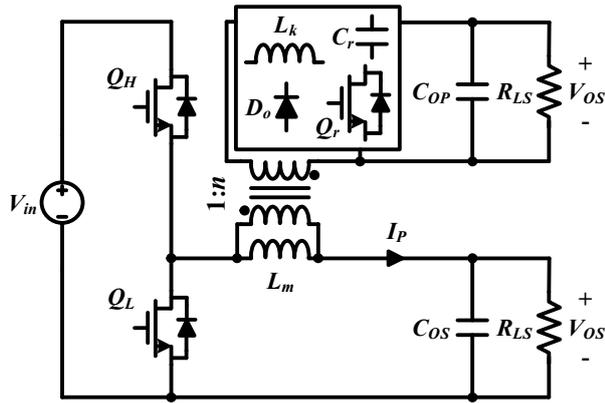


그림 2. 제안하는 컨버터의 회로도.
Fig. 2. Circuit of proposed converter.

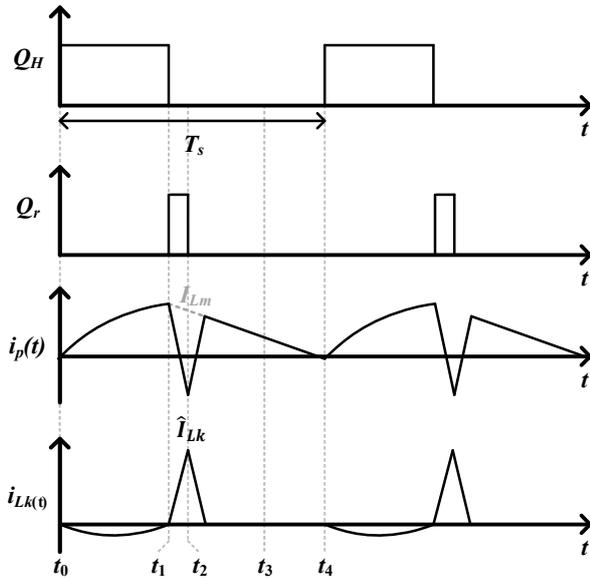


그림 3. 제안하는 컨버터의 전압, 전류 파형.
Fig. 3. Voltage, current waveforms of proposed converter.

2. 본 론

2.1 제안하는 컨버터의 동작 원리

제안하는 컨버터는 그림 2와 같이 1차측은 입력 전압 V_{in} , 하이 사이드 스위치 Q_H , 로우 사이드 스위치 Q_L , 결합 인덕터의 인덕턴스 성분 L_m , 출력 커패시터 C_{OP} , 부하 저항 R_{LS} 로 구성되어 있다. 2차측은 결합 인덕터의 누설 인덕턴스 L_k , 그리고 이와 공진을 이루는 커패시터 C_r 및 스위치 Q_r , 그리고 출력 다이오드 D_o , 출력 커패시터 C_{OS} , 부하 저항 R_{LS} 로 이루어져 있다. 해당 회로는 하이 사이드 스위치 Q_H 가 켜져있는 동안 1차측의 에너지를 공진 커패시터 C_r 에 저장시키며, 공진 스위치 Q_r 의 제어를 통해 출력단으로 전달되는 에너지의 양을 조절하여 출력 전압의 정류 및 부스팅을 수행한다. 상세한 동작 원리는 네 구간으로 나누어 그림 3과 함께 설명한다.

2.1.1 모드 1 ($t_0 - t_1$)

하이 사이드 스위치 Q_H 가 켜진다. 로우 사이드 스위치

표 1 실험에서 사용된 소자값 및 세부사항.

Table 1 Component values and details of the experiment.

| Parameters | Comment | Value |
|------------------|-------------------|--------------------|
| V_{in} | 입력 전압 | 12 V |
| f_s | 스위칭 주파수 | 100 kHz |
| V_{OP} | 비절연측의 출력 전압 | 5 V |
| V_{OS} | 절연측의 출력 전압 | 15 V |
| n | 권선비 (N_s/N_p) | 0.8 |
| L_m | 자화 인덕턴스 | $8.8 \mu\text{H}$ |
| L_k | 누설 인덕턴스 | $1.1 \mu\text{H}$ |
| C_r | 보조 커패시턴스 | $1.47 \mu\text{F}$ |
| C_{OP}, C_{OS} | 출력 커패시턴스 | $220 \mu\text{F}$ |

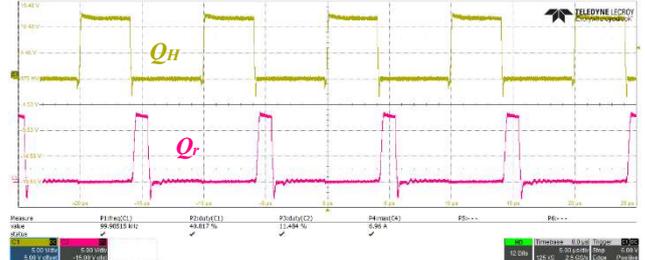


그림 4. MOSFET Q_H 및 Q_r 게이트 전압 파형.
Fig. 4. MOSFET Q_H and Q_r gate voltage waveforms.

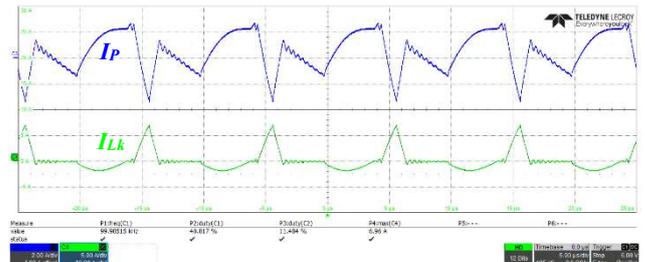


그림 5. 1차측 전류 및 누설 인덕터 전류 파형.
Fig. 5. Primary and leakage inductor current waveforms.

Q_L 은 모든 시간에서 Q_H 와 상보적으로 동작한다. Q_H 가 켜져있는 동안, 변압기의 1차측으로부터 2차측 공진 커패시터 C_r 로 에너지가 전달되며 이는 공진 스위치 Q_r 의 기생 다이오드의 경로를 통해 이루어진다.

2.1.2 모드 2 ($t_1 - t_2$)

Q_H 가 꺼지고 Q_r 이 켜진다. C_r 에 저장되어 있던 에너지가 방출되며, 2차측 전류가 상승한다. 이때 2차측 전류의 첨두값에 따라 2차측 전압의 정류 및 승압이 이루어진다.

2.1.3 모드 3 ($t_2 - t_3$)

Q_r 이 꺼지면 누설 인덕터의 에너지가 출력 다이오드 D_o 를 통해 출력단으로 전달된다.

2.1.4 모드 4 ($t_3 - t_4$)

Q_r 은 꺼진 상태로 유지되며, 이 상태는 Q_H 가 다시 켜지기 전까지 지속된다.

2.2 실험 결과

본 논문이 제안하는 컨버터의 동작을 실험을 통하여 확인하였다. 실험에 이용된 소자값 및 세부사항은 표 1과

같으며, MOSFET은 FDS3572, 다이오드는 FSV2050V를 사용하였다. 변압기는 1차측 권선수 5T, 2차측 권선수 4T를 갖도록 설계하였으며, TMS320F28335 를 통한 디지털 제어를 수행하였다.

실험은 비절연측, 절연측 각 3 W 조건에서 진행되었으며, 그림4 및 그림 5는 각각 MOSFET Q_H 와 Q_L 의 게이트 전압 파형, 1차측 전류 I_p 와 2차측 누설 인덕터의 전류 I_L 이다. 이를 통해 실험파형과 이론적인 파형이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문은 종래의 플라이백 컨버터에 보조 요소가 추가된 구조를 제안하였다. 제안하는 구조의 보조 요소는 커패시터와 스위치로 구성되며, 절연측에 위치하여 에너지를 저장 및 전달한다. 결합 인덕터의 누설 인덕터가 활용되며, 누설 인덕터와 공진 커패시터와의 공진이 스위치를 통해 조절되어 절연측 출력 전압의 정확한 정류 혹은 승압 동작이 이루어지게 된다. 이를 통해 플라이백 컨버터의 전력 밀도를 향상시킬 수 있다.

제안하는 구조의 동작 원리를 네 가지 모드로 나누어 스위칭에 따른 전류 파형을 통해 기술하였으며, 실험을 통해 기본 동작 원리 및 승압이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원되었음 (과제번호:R22XO02-09)

이 연구는 2023년 중소벤처기업부의 기업연계형 연구개발 인력양성사업(RS-2023-00258860) 연구비 지원에 의한 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Karlsson, Magnus, and Oscar Persson. "Isolated fly-buck converter, switched mode power supply, and method of measuring a voltage on a secondary side of an isolated fly-buck converter." U.S. Patent No. 9,755,532. 5 Sep. 2017.
- [2] Wang, W., Lu, D., Chai, Q., Lin, Q. and Cai, F., "Analysis of fly-buck converter with emphasis on its cross-regulation", IET Power Electronics, 10: 292-301, 2017.