

15kW급 양방향 플라이백 컨버터 설계

정창교, 권재현, 최재혁, 남승민, 이준영[†]

명지대학교 전기공학과

15kW bi-directional flyback converter design

Chang-Gyeo Jeong, Jae-Hyun Kwon, Jae-Hyuck Choi, Seung-Min Nam, and Jun-Young Lee[†]

Myongji University Electrical Engineering

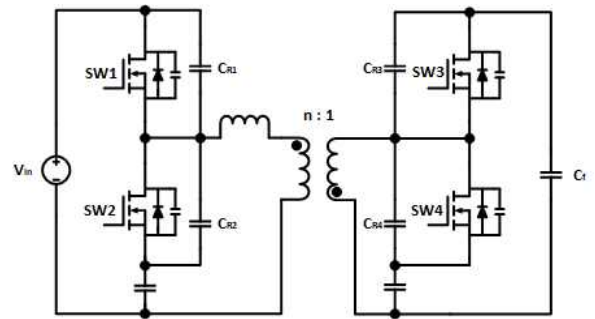
ABSTRACT

본 논문은 15kW급 양방향 플라이백 컨버터를 제안한다. 기존 플라이백 컨버터에서 액티브 클램프를 적용하여, 변압기 누설 인덕턴스에 저장된 에너지를 재활용 하여 메인스위치의 전압스파이크를 최소화 하였고, 또한 각 스위치별 병렬 커패시터를 적용하여 dv/dt , di/dt 의 적절한 기울기를 확보 하여 각 스위치 가해지는 전압 스트레스를 최소화 하였다. 1차 측과 2차 측 대칭구조로 적용하였다. 모든 스위치 소자는 SiC-MOSFET를 적용하였으며, 스위칭 주파수 80kHz 조건에서 입력전압 400V 이며 출력전압 330V, 조건에서 총 5구간(3.4kW, 6.3kW, 10kW, 13kW, 15kW)에서 정상 동작을 확인 하였으며, 정방향 최대 효율은 10kW 에서 98.04% 정격 출력 효율은 15kW에서 96.8% 달성하였다.

1. 서 론

최근 기후변화의 문제점과 화석연료의 자원 고갈로 인하여 여러 가지 대체 자원과 자원의 효율성을 높이는 대안들에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이에 따라 최근 신재생 에너지 와 친환경 자동차 분야에 높은 효율 과 전력밀도를 갖춘 양방향 전력변환장치의 필요성이 대두되고 있으며, 특히 배터리를 활용한 어플리케이션은 점차 고전압 대용량 분야로 확장되고 있다. 본 논문에서는 이와 같이 산업 변화에 따른 대안을 제시하고자 15kW 양방향 플라이백 토폴로지를 제안 한다. 본 논문에서 제안하는 15kW 양방향 플라이백 컨버터는 액티브 클램프를 1차 측과 2차 측 대칭구조로 설계 하였으며, 이는 하드 스위칭(Hard-Switching)을 통해 발생하는 스위칭 손실을 해결하기 위해 누설 인덕턴스에 저장된 에너지를 재활용하여 스위칭 소자에 전압스파이크를 최소화 하였다.^[1] 이는 누설 인덕턴스와 스위치의 드레인과 소스 간(Drain to Source) 존재하는 기생커패시턴스의 공진을 통해 제안하는 회로의 모든 스위치 소자의 ZVS(Zero-Voltage-Switching)를 가능하게 설계 하였으며 또한 Topology에 적용된 전력 스위칭 소자의 드레인과 소스 간 병렬로 연결한 커패시터들은 기존 플라이백 Topology의 문제점이었던 급격한 dv/dt , di/dt 기울기를 적절하게 조절하여 각 스위치 가해지는 전압 스트레스를 최소화 하여 기존에 플라이백 Topology로 구현하기 어려웠던 용량 15kW급 양방향 플라이백 컨버터를 본 논문에서 소개하고 시제품을 제작, 실험 결과를 발표한다.

2. 본 론



1 제안하는 Topology 회로

Fig 1 Proposed Topology circuit

본 논문에서 제안하는 DC/DC 컨버터의 구조는 그림 1과 같다. 입력전압은 400V이며, 출력전압은 75V~500V의 범위를 가진다. 해당 Topology는 기존 플라이백 컨버터에 스너버 역할을 주로 수동 소자로 활용해 왔으나 본 논문에서는 스너버 대신 능동형 액티브 클램프(Active-Clamp) 회로를 설계하여 기존 플라이백 컨버터의 단점을 해소하며,^[2-3] PWM 가변을 통한 폭넓은 출력전압 범위를 가진다. 본 논문에서 제안하는 15kW급 양방향 플라이백 컨버터는 기존 플라이백의 단점인 변압기 누설 인덕턴스와 스위치의 드레인 과 소스 간 기생커패시턴스와의 공진은 스위치에 큰 전압스파이크와 하드 스위칭 동작으로 스위치에 큰 전압스트레스를 가해진다. 이를 해결하기 위해 액티브 클램프 회로를 적용하여 누설 인덕터에 저장된 에너지를 재활용하여 제안하는 플라이백 Topology에 ZVS을 조건을 가능하게 한다. ZVS 동작 조건을 설계하기 위해서는 누설 인덕턴스와 스위치 드레인 과 소스 간 기생커패시턴스의 상관관계로 설계 가능하며, 최소 누설 인덕턴스는 식 (1)을 이용하여 설계가 가능하고, 여기서 I_p 는 변압기 1차 측 초기전류, V_M 은 스위치에 걸리는 전압, T_{dead} 는 스위치 간 dead-time이다.

$$L_k \geq \frac{2L_p V_M T_{dead} - 2C_{ds} V_M^2}{2I_p^2} \quad (1)$$

또한 클램프 스위치와 메인스위치에 각각 병렬로 장착한 커패시터는 기존 플라이백 Topology에서의 문제점중 하나인 스

위치 드레인 과 소스 간 급격한 전압 기울기(dv/dt), 전류 기울기(di/dt)를 적절하게 조절하여 스위치에 가해지는 스트레스를 최소화 하여 안정적인 구동을 확보 하였다.

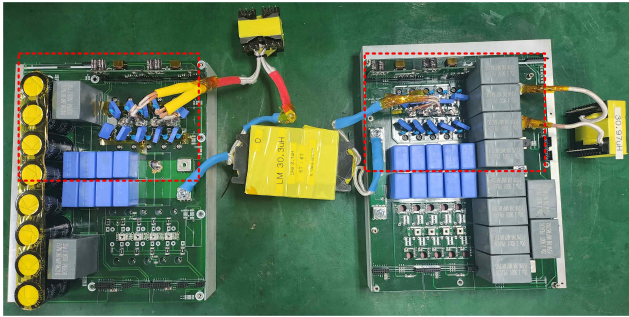
플라이백 컨버터의 경우 변압기를 통한 1차 측과 2차 측의 절연과 자화 인덕턴스를 통한 에너지 저장의 역할까지 수행하기 때문에 변압기의 부피 설계는 식 (2)를 이용하여 설계할 수 있고 J는 전력밀도, Bm은 최대 자속밀도, K는 K-factor, Lm은 자화 인덕턴스, Im은 자화전류이다.

$$A_p = \left(\frac{L_m I_{m_{pk}} I_{m_{avg}} \cdot 10^4}{JB_m K} \right)^{1.31} \quad (2)$$

본 논문에서 제안하는 Topology 구조는 1차 측과 2차 측 대칭 구조로 설계함으로 기존 Topology 대비 양방향 최적 설계가 가능하다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 15kW급 양방향 플라이백 컨버터를 제작하여 실제 입력전압 400V를 인가하여 출력 330V, 정격 출력 15kW 까지 실험을 진행하여 성능을 확인하였다. 그림 2는 제작된 프로토타입 플라이백 DC/DC 컨버터이고, 표 1은 설계 사양을 보여준다.



2 제안하는 플라이백 하드웨어 사진
Fig 2 Proposed Flyback hardware picture

표 1 설계 사양

Table 1 Design specification

파라미터	값
출력전력	15kW
입력전압(V _{in})	400V
출력전압(V _o)	330V
출력전류(I _o)	45A
스위칭 주파수(f _s)	80kHz
변압기 자화 인덕턴스(L _m)	30μH
충 누설 인덕턴스(L _k)	5μH
변압기(N _p :N _s)	1:1
변압기 사용 코어	EE8076*5
누설 인덕터 사용 코어	PQ5050
스위칭 소자	G3R40MT12D
출력 필터 인덕터	30μH

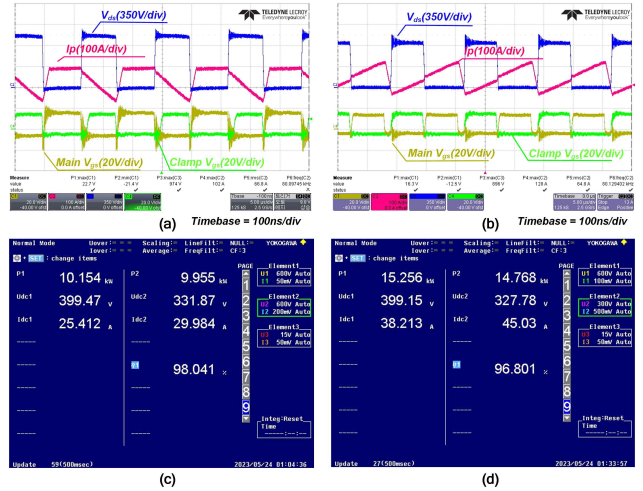


그림 3 정방향 주요 파형 및 효율측정

Fig 3 Forward key waveforms and

(a) 입력 : 400V, 출력 : 330V, 15kW, 1차 측 파형

(b) 입력 : 400V, 출력 : 330V, 15kW, 2차 측 파형

CH1	CH2	CH3	CH4
Main S/W V _{gs}	변압기 전류	Main S/W V _{ds}	Clamp S/W V _{gs}

(c) 최대 효율 : 98.04% , (d) 정격 출력 효율 : 96.8%

그림 3의 (a), (b)는 정방향 동작 시 15kW에서 파형이며, (c)는 10kW 최대 효율 : 98.04%, (d)는 15kW 정격 출력 효율 : 96.08%의 효율 측정을 확인 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 15kW급 양방향 플라이백 컨버터를 설계 및 제작하였으며 액티브 클램프 회로를 적용하여 ZVS 동작 확보 및 각 스위치별 병렬로 커패시터 적용을 통해 기존 플라이백 컨버터들의 문제점이었던 급격한 dv/dt, di/dt 기울기를 적절하게 조절하여 각 스위치 가해지는 전압 스트레스를 최소화 하여, 정방향 최대 효율은 10kW 에서 98.04% 정격 출력 효율은 15kW에서 96.08% 달성하였다. 추후 양방향 효율 측정 및 검증 실험을 진행할 예정이다.

이 논문은 국토교통과학기술진흥원의 “환경부하 저감을 위한 친환경 고효율 말단배출 기술개발” (No. KA162618) 과 산업통상자원부 지원 프로그램 “ 자동차 산업 기술 개발” (No. 20018958) 연구비 지원 에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 권혁민, 공소정, 최재혁, 홍대영, 이준영, (2022). 액티브 클램프 플라이백 컨버터를 이용한 3.3kW 양방향 OBC 설계. 전력전자학회논문지, OS1, 4-6
- [2] Jun-Young Lee; Jae-Hyuck Choi; Hyeok-Min Kwon; “Design of a 3.3kW/100kHz EV Charger Based on Flyback Converter with Active-Snubber” IEEE Transactions on Vehicular Technology (Early Access), 19 April 2022.
- [3] 김종우,(2011). 누설 인덕터 에너지를 회수하는 직렬입력 병렬출력 인터리빙 플라이백 컨버터. KAIST 석사학위논문