

ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터의 손실 저감을 위한 보조 회로 설계

정원상*, 이순령*, 이종영*, 박윤지*, 원충연*, 이제현**
성균관대학교*, LG 이노텍**

Design of Auxiliary Circuit to Reduce Loss of ZVT Interleaved Flyback Converter

Won-sang Jung*, Soon-ryung Lee*, Jong-young Lee*, Yun-ji Park*, Chung-yuen Won*, Je-Hyun Yi**
Sungkyunkwan University*, LG Innotek Co.**

ABSTRACT

This paper presents design of auxiliary circuit to reduce loss of ZVT interleaved flyback converter. The ZVT interleaved converter using the conventional auxiliary circuit has a large conduction loss due to the constant circulating current in the auxiliary circuit. The auxiliary circuit proposed in this paper, which consists of the coupled inductor and DC link capacitor, has linearly increasing or decreasing auxiliary current. Then, the conduction loss occurring in the auxiliary circuit is reduced. The validity of the proposed auxiliary circuit is verified with the prototype of 500W

1. 서 론

Flyback 컨버터는 적은 구성 소자로 단순한 구조를 가지며 변압기로 절연되어 있어 저용량의 전원 공급 장치에 주로 사용된다. Flyback 컨버터는 회로 구조상 스위치에 입·출력 전압의 합이 인가되기 때문에 스위치의 전압 스트레스가 높은 편이며, 변압기의 누설 인덕터 성분으로 인해 스위치에 전압 스파이크가 발생하여 Flyback 컨버터의 효율을 저감시키는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 기존의 논문에서는 인터리브드 구조 사이를 보조 단일 인덕터로 연결해주어 ZVT 조건하에 동작하는 Flyback 컨버터를 제안하였다^[1]. 기존 논문에서 제안된 Flyback 컨버터는 보조 회로가 단일 인덕터로만 구성되어 있어 구조가 간단하고 작은 부피를 가진다는 장점이 있다. 하지만 이 경우 최대 보조 회로 전류가 일정하게 유지되면서 컨버터 내부를 순환하는 구간이 발생하게 된다. 이로 인해 매 주기마다 스위치의 도통 손실 발생하여 효율을 저감시키는 문제가 있다.

본 논문에서는 기존의 논문^[1]과 동일한 토폴로지에 결합 인덕터와 DC Link 커패시터로 구성된 보조 회로를 설계하여, ZVT 동작은 유지하면서 최대 보조 회로 전류의 순환으로 발생하는 도통 손실을 저감시켰다. 또한 합리적인 보조 회로 설계를 위해 컨버터의 동작 모드를 분석하고, 주요 파라미터의 수식을 유도하였다. 이는 500W급 시작품의 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

본 논문에서 제안하는 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터 회로도에는 그림 1과 같다.

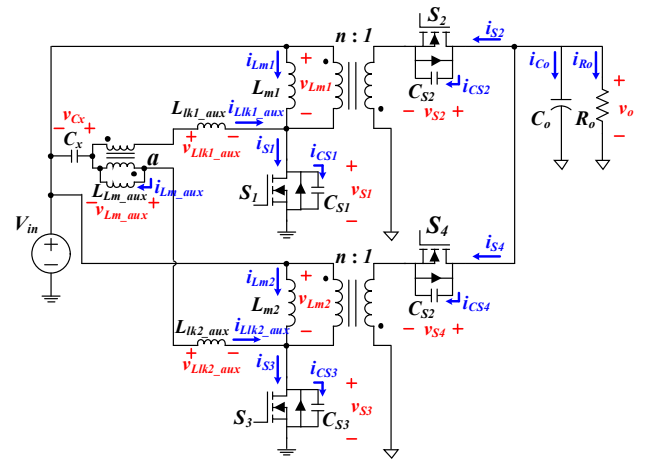


그림 1 보조 회로를 이용한 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터
Fig. 1 ZVT Interleaved flyback converter using auxiliary circuit

변압기의 2차측은 전류로 인한 도통 손실을 최소화하기 위해 동기 정류기를 사용하고, 소자의 전류 스트레스 및 출력 전류 리플 저감을 위해 인터리브드 구조를 가진다. ZVT 동작을 위한 보조 회로는 1:1 턴수비를 갖는 결합 인덕터와 DC Link 커패시터로 구성되며 변압기 1차측 인터리브드 사이에 연결된다.

2.1 보조 회로 전압 방정식

보조 회로의 설계를 위해 입력 전원 보조 회로 1차측 스위치의 각 페루프에 KVL을 적용하고 노드 a 지점에 KCL을 적용하여 정리하면 다음과 같이 보조 회로의 전압 방정식을 유도할 수 있다. 여기서 v_{Cx} 는 무시할 만큼의 작은 값을 가지므로 수식 유도에서 0으로 가정하며 보조 결합 인덕터의 1차측 및 2차측 누설 인덕턴스는 동일하다고 가정한다.

$$v_{Lm_aux}(t) = \frac{L_{m_aux}}{2L_{m_aux} + L_{lk_aux}} \cdot (v_{S3} - v_{S1}) \quad (1)$$

2.2 동작 모드 분석

ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터의 스위치 상태에 따른 각 주요 파형을 그림 2에 도시하였다. 본 논문에서 제안하는 컨버터가 ZVT 조건하에 동작하기 위해서는 그림 2와 같이 테트라 임 구간에서 보조 누설 인덕터의 전류의 크기가 주 자화 인덕터의 전류의 크기보다 커야한다.

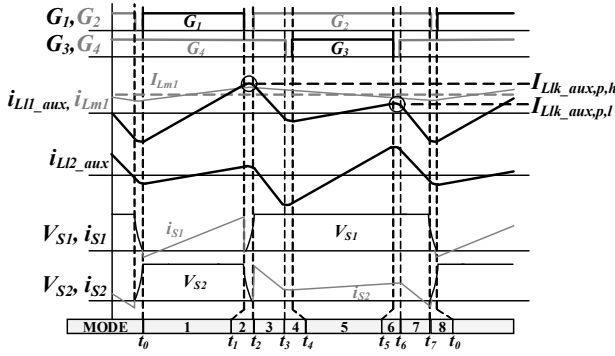


그림 2 제안하는 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터의 주요 파형
Fig. 2 Key waveforms of ZVT Interleaved flyback converter

따라서 보조 누설 인덕터에 흐르는 전류의 최댓값은 보조 회로를 설계하는데 중요한 고려 사항이 되며 수식은 다음과 같다.

$$I_{Llk_aux,p,h} = \frac{(1-k-D) \cdot V_{in} \cdot DT}{L_{lk_aux} \cdot (1-D) \cdot 2} \quad (2)$$

$$I_{Llk_aux,p,l} = \frac{(k-D) \cdot V_{in} \cdot DT}{L_{lk_aux} \cdot (1-D) \cdot 2} \quad (3)$$

2.3 보조 회로 설계

본 논문에서는 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터가 ZVT 조건을 확보하는 범위에서 한 주기 동안 보조 회로의 실효 전류가 최소가 되도록 보조 회로를 설계한다.

ZVT 조건하에 스위칭 동작을 하기 위해서는 보조 누설 인덕터의 에너지가 두 스위치의 기생 커패시터의 에너지보다 커야한다. 따라서 보조 누설 인덕터에 저장되는 에너지가 두 기생 커패시터에 저장되는 에너지보다 더 큰 값을 가지는 조건식을 구하면 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$\sqrt{\frac{L_{lk_aux}}{2 \cdot Cs} \left\{ \frac{V_o}{2 \cdot n \cdot R \cdot (1-D)} - \frac{1-D-k}{L_{lk_aux} \cdot (1-D)} \cdot \frac{V_{in} \cdot DT}{2} \right\}} \geq V_{in} + n \cdot V_o \quad (4)$$

식 (4)를 통해 ZVT 조건이 만족되는 범위 안에서 보조 누설 인덕턴스 값의 범위를 지정할 수 있다. 보조 누설 인덕턴스가 작을수록 짧은 데드타임 구간에서 ZVT 조건을 만족할 수 있지만, 보조 회로 전류의 실효치가 상승하여 도통 손실이 증가하게 된다. 따라서 보조 회로를 설계할 때, 한 상의 컨버터에 발생하는 스위치 도통 손실을 고려해야 한다.

그림 3은 한 상의 컨버터의 스위치(S_1 , S_2) 전류 파형을 나타낸다. 이 파형을 삼각형 및 사다리꼴로 근사화하여 한 주기 동안 한 상의 컨버터에서 발생하는 스위치 도통 손실(P_{con1_loss})을 구할 수 있고, 이는 식 (5)과 같이 각 스위치 전류의 피크값으로 표현 된다. 각 스위치 전류 피크값은 상세 동작 모드 분석을 통해 구할 수 있다.

$$P_{con1_loss} = \left[\begin{aligned} & \frac{1}{3} (I_{S1_1})^2 \cdot D \cdot R_{ds(on)} + \frac{1}{3} (I_{S2_4})^2 \cdot (0.5-D) \cdot R_{ds(on)} \\ & \frac{1}{3} \left\{ (I_{S2_2})^2 + (I_{S2_2}) \cdot (I_{S2_3}) + (I_{S2_3})^2 \right\} \cdot (0.5-D) \cdot R_{ds(on)} \\ & + \frac{1}{3} \left\{ (I_{S2_3})^2 + (I_{S2_3}) \cdot (I_{S2_4}) + (I_{S2_4})^2 \right\} \cdot D \cdot R_{ds(on)} \end{aligned} \right] \quad (6)$$

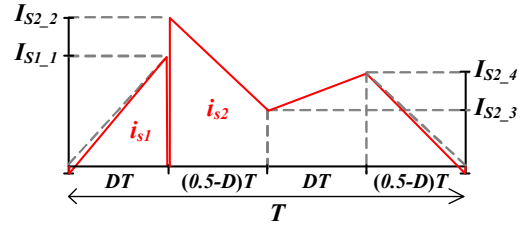


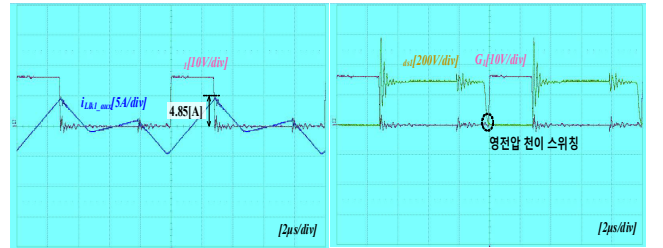
그림 3 1차측 스위치(S_1 , S_2)에 흐르는 전류 파형
Fig. 3 Current waveform on primary switch(S_1 , S_2)

3. 실험 결과

표 1 실험 파라미터

Table 1 Experimental parameter

파라미터, 기호	값	파라미터, 기호	값
정격 용량, P	500[W]	주 자화 인덕터, L_m	650[μH]
입력 전압, V_{in}	190[V]	출력 커패시터, C_o	330[μF]
스위칭 주파수, f_s	100[kHz]	보조 자화 인덕터, L_{m_aux}	41[μH]
듀티비, D	0.2-0.3	보조 누설 인덕터, L_{lk_aux}	29[μH]
주 변압기 권선비, N_1/N_2	1	DC-Link 커패시터, C_c	10[μF]



(a) G_1 및 i_{LL1_aux} 파형

(b) G_1 및 v_{S1} 파형

그림 4 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터의 실험 결과

Fig. 4 Experimental results of ZVT Interleaved flyback converter

표 1은 본 논문에서 제안하는 보조 회로 설계 범위를 고려하여 선정한 실험 파라미터이다. 100[kHz]의 스위칭 주파수로 동작할 시, 보조 누설 인덕터의 전류 파형 및 ZVS 조건하에 스위칭 동작을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 ZVT 인터리브드 Flyback 컨버터의 보조 회로 설계 방법을 제안한다. 기존의 토폴로지에서는 최대 보조 회로 전류가 순환하는 구간이 존재하여 도통 손실이 증가하였다. 본 논문에서 제안하는 보조 회로의 경우 보조 회로 전류의 실효치가 감소하여 더 낮은 도통 손실에서 ZVT 조건을 확보할 수 있었다. 스위치 상태에 따른 동작 모드를 분석을 통해 보조 회로의 설계 조건 수식을 유도하였고, 이를 바탕으로 500W급 시작품의 실험을 진행하여 본 논문의 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

[1] Yao Ching Hsieh, Ming Ren Chen, and Hung Liang Cheng, "An Interleaved Flyback Converter Featured With Zero Voltage Transition", IEEE Transactions on Power Electronics 26.1 (2011):79-84.