

절연형 풀브리지 타입 전력변환기에서의 변압기 포화에 관한 연구

김정훈, 차헌녕, 김흥근
경북대학교

A Study on Transformer Saturation in Isolated Full-bridge Type Power Converters

Jeonghun Kim, Honnyong Cha, Heung-Geun Kim
Kyungpook National University

ABSTRACT

절연형 전력변환기에서 사용되는 고주파 변압기는 반도체 소자의 스위칭 시간, 전압 강하, 게이트 신호의 불균형 등으로 인해 변압기의 양과 음의 전압-시간(volt-second)에 차이가 발생할 수 있다. 본 논문은 절연형 풀브리지 타입 전력변환기에서 DC 성분에 의한 변압기 코어의 포화문제를 방지하기 위해 사용되는 DC 블로킹 캐패시터(DC blocking capacitor)의 설계 방법에 대해 분석하고 실험을 통해 증명한다.

1. 서 론

변압기에 인가되는 전압은 반도체 소자의 스위칭 시간, 전압 강하, 파라미터 불일치와 게이트 신호의 불균형 등으로 인해 변압기의 양과 음의 전압-시간에 차이가 발생한다^[1]. DC 성분은 코어에 원하지 않는 DC 자속밀도(flux density) 성분을 발생시키고 비선형의 자화 전류를 생성한다^[2]. DC 성분에 의한 변압기 코어의 포화문제를 방지하기 위해 DC 블로킹 캐패시터를 이용하는 방법은 가장 많이 사용되는 방법 중 하나이다.

본 논문에서는 절연형 풀브리지 타입 전력변환기에서 변압기의 포화를 방지하기 위해 사용되는 DC 블로킹 캐패시터의 설계 방법에 대해 분석한다. 두 가지 펄스폭변조(PWM) 제어 방식을 해석하고 이를 1kW 절연형 풀브리지 컨버터 시제품을 제작하여 실험을 통해 증명한다.

2. DC 블로킹 캐패시터가 추가된 절연형 풀브리지 컨버터

그림 1은 전압형 절연형 풀브리지 컨버터에서 DC 성분에 의한 변압기 코어의 포화를 방지하기 위해 변압기에 DC 블로킹 캐패시터를 직렬 연결한 회로이다. 캐패시터가 추가된 절연형 풀브리지 컨버터의 동작원리는 기존의 컨버터와 동일하다. 변압기의 권선비는 설명의 편의를 위해 1:1로 구성한다.

2.1 듀티비 PWM 제어

1) 1차측에 연결

그림 2(a)는 DC 블로킹 캐패시터를 변압기 1차측에 연결한 경우의 파형을 나타낸다. 실선은 정상적인 조건의 정상상태에서의 동작파형을 나타내고 점선은 게이트 신호 불일치 시의 동

작파형을 나타낸다. 전압 v_{ab} 와 DC 블로킹 캐패시터 전압 v_c 및 변압기 1차측 전압 v_p 의 관계식은 다음과 같다.

$$v_p = v_{ab} - v_c \quad (1)$$

그림 2(a)의 점선파형처럼 게이트 신호의 불일치로 인해 S_1 , S_4 의 듀티비가 S_2 , S_3 의 듀티비 보다 작은(큰) 신호가 인가되는 경우 v_{ab} 의 평균 전압은 0이 아닌 음(양)의 값을 갖는다. 식 (1)로부터 다음과 같은 식이 성립된다.

$$v_{ab,avg} - v_{c,avg} = v_{p,avg} = 0 \quad (2)$$

DC 블로킹 캐패시터를 변압기 1차측에 직렬로 연결하면 식 (2)로부터 v_c 의 평균전압은 v_{ab} 의 평균전압과 같다. 그림 2(a)의 v_p 파형에서 보듯이 변압기 1차측에 연결된 DC 블로킹 캐패시터는 게이트 신호의 불일치로 형성된 DC 성분을 상쇄시켜 변압기의 코어가 자속 균형 (flux-balance 또는 volt-second) 조건을 만족하도록 한다.

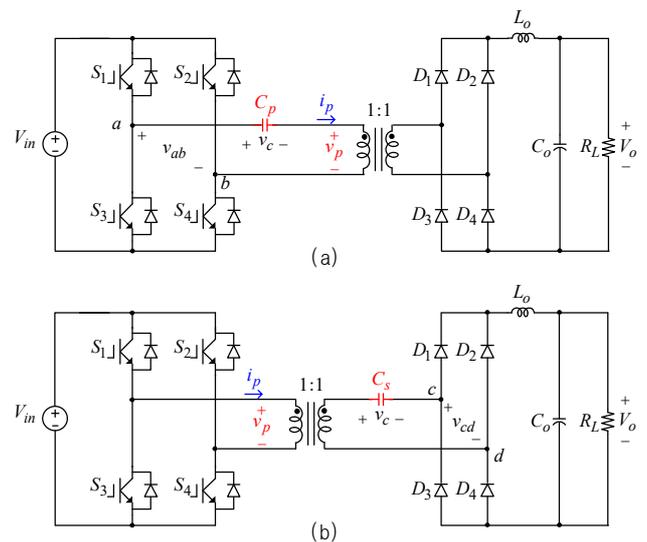


그림 1 DC 블로킹 캐패시터가 추가된 절연형 풀브리지 컨버터 회로 (a) 1차측 (b) 2차측

Fig. 1 Conventional isolated full-bridge converter with DC blocking capacitor on the (a) primary side (b) secondary side

2) 2차측에 연결

그림 2(b)는 DC 블로킹 캐패시터를 변압기의 2차측에 연결한 경우의 파형을 나타낸다. 동작모드는 1차측에 연결한 경우와 동일하지만 형성되는 전압파형은 달라진다. $v_{ab} = v_p$ 이고, v_p 와 전압 v_{cd} 의 관계식은 다음과 같다.

$$v_p = v_{cd} + v_c \quad (3)$$

그림 2(b)의 점선파형처럼 게이트 신호 불일치 시, DC 블로킹 캐패시터를 2차측에 연결한 경우는 1차측에 연결한 경우와는 달리 DC 성분을 보상해준다.

$$v_{c,avg} + v_{cd,avg} = v_{p,avg} = 0 \quad (4)$$

$$v_{c,avg} = -v_{cd,avg} = -v_{p,avg}^* \quad (5)$$

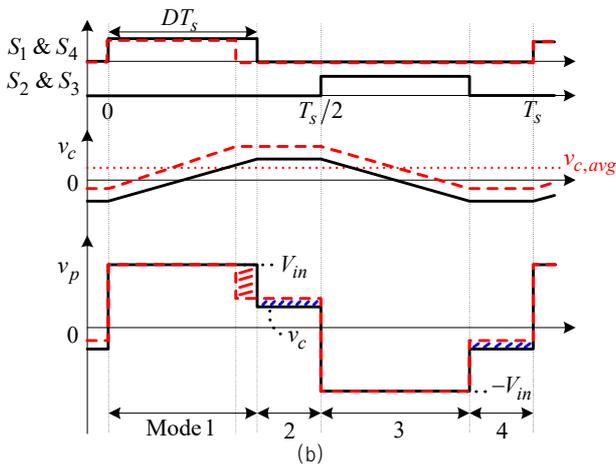
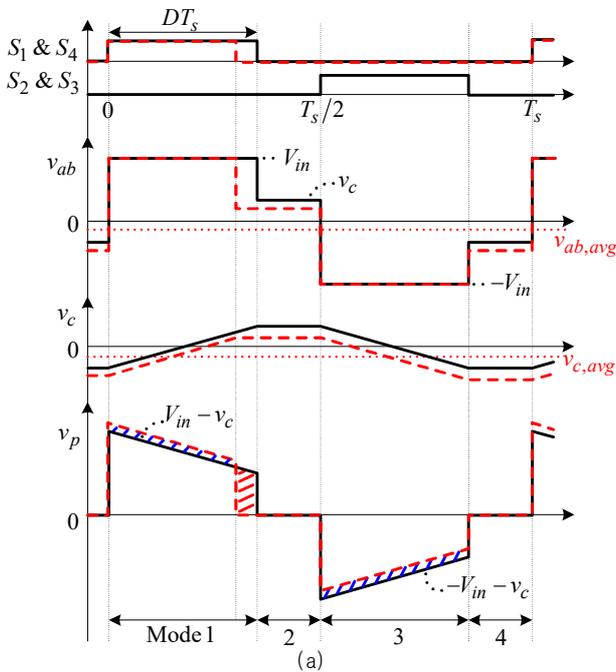


그림 2 DC 블로킹 캐패시터가 추가된 듀티비 PWM 절연형 풀브리지 컨버터의 주요파형 (a) 1차측 (b) 2차측
Fig. 2 Key waveforms of duty cycle PWM isolated full-bridge converter with DC blocking capacitor on the (a) primary side (b) secondary side

$v_{p,avg}^*$ 는 변압기에 인가되는 DC 성분을 나타낸다. 식 (5)로부터 v_c 의 평균전압은 변압기에 인가되는 DC 성분의 음의 크기와 같다. 그림 2(b)의 v_p 파형에서 게이트 신호의 불일치로 줄어드는 전압-시간은 모드 2, 4 구간동안 v_c 에 의해 보상되고 변압기 코어는 자속 균형 조건을 만족하게 된다.

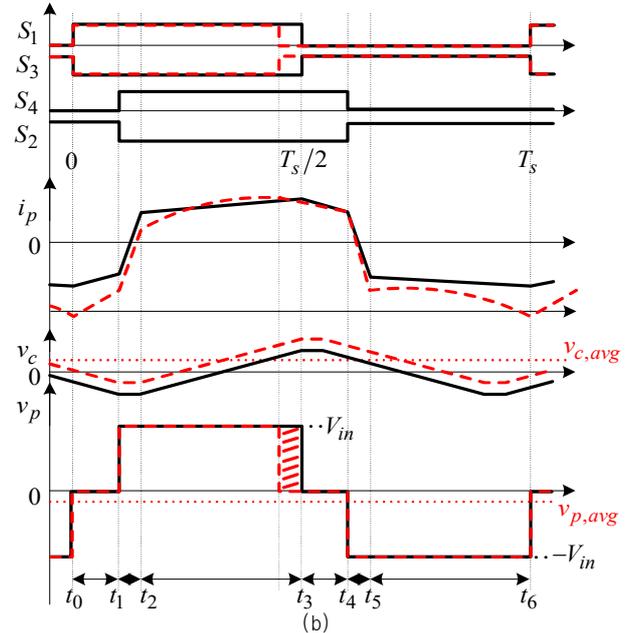
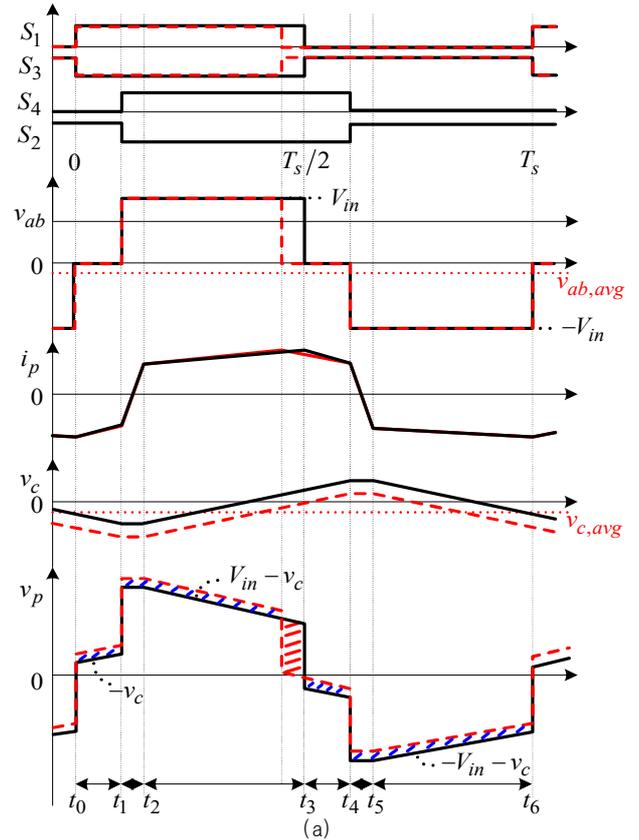


그림 3 DC 블로킹 캐패시터가 추가된 위상천이 PWM 절연형 풀브리지 컨버터의 주요 파형 (a) 1차측 (b) 2차측
Fig. 3 Key waveforms of phase-shift PWM isolated full-bridge converter with DC blocking capacitor on the (a) primary side (b) secondary side

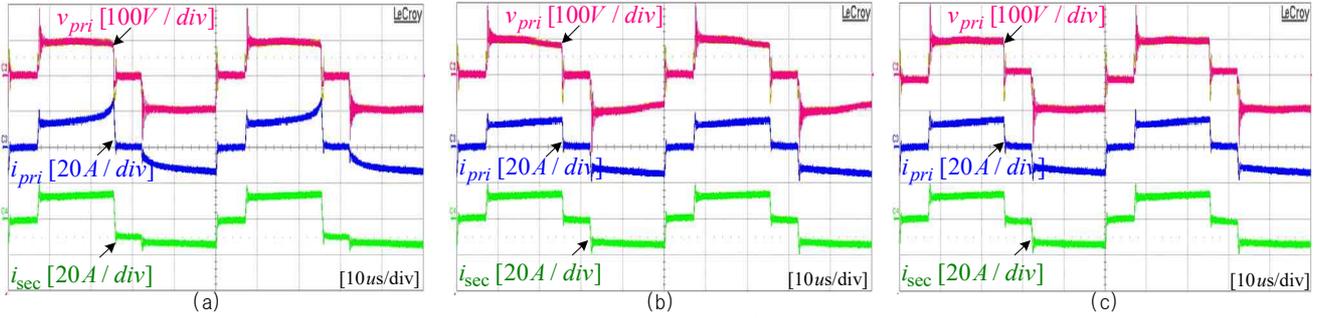


그림 4 듀티비 PWM 전압형 폴브리지 컨버터 실험파형 (a) 불균형 (b) 1차측 캐패시터 (c) 2차측 캐패시터

Fig. 4 Experimental waveforms of duty cycle PWM voltage-fed isolated full-bridge converter (a) mismatch (b) capacitor on the primary side (c) capacitor on the secondary side

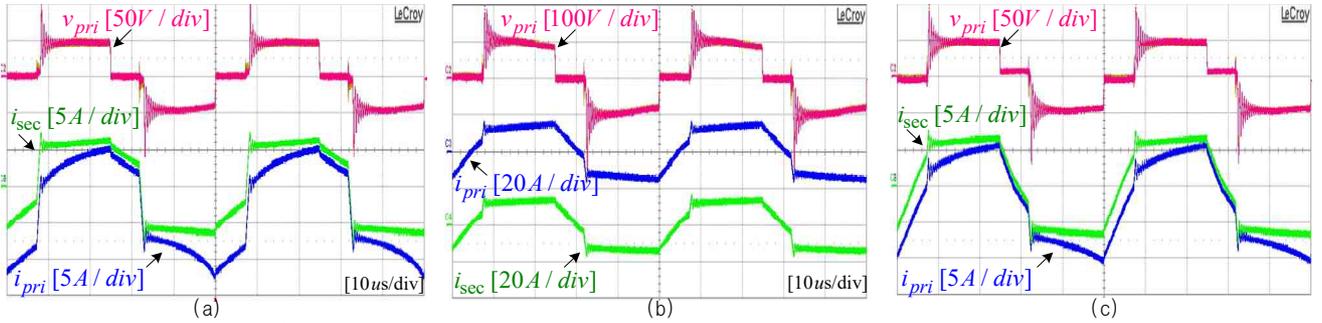


그림 5 위상천이 PWM 전압형 절연형 폴브리지 컨버터 실험파형 (a) 불균형 (b) 1차측 캐패시터 (c) 2차측 캐패시터

Fig. 5 Experimental waveforms of phase-shift PWM voltage-fed isolated full-bridge converter (a) mismatch (b) capacitor on the primary side (c) capacitor on the secondary side

표 1 시제품의 전기적 사양

Table 1 Electrical specifications of the prototype converter

Output power	1kW
Input / output voltage	100 V _{DC} / 70 V _{DC}
Switching frequency	20kHz
IGBT ($S_1 - S_4$)	SKM100GB128D
L_o	300μH
DC blocking Capacitor	10μF

2.2 위상천이 PWM 제어

1) 1차측에 연결

그림 3(a)는 캐패시터를 변압기 1차측에 연결한 파형으로 v_{ab} 와 v_p 의 관계식은 식 (1)과 같다. 식 (2)를 만족하고 듀티비 PWM 제어방법과 동일한 원리로 DC 성분을 상쇄시킨다.

2) 2차측에 연결

그림 3(b)는 캐패시터를 변압기 2차측에 연결한 파형이다. v_p 와 v_c 의 관계식은 식 (3)과 같지만 v_p 는 v_c 가 아닌 스위칭 상태에 따라 전압이 결정된다. 그러므로 형성된 DC 성분은 캐패시터에 의한 상쇄나 보상 없이 변압기에 그대로 인가된다.

2.3 실험결과

본 논문에서는 분석내용을 검증하기 위해 표 1에 명시된 사양에 맞춰 1kW 절연형 폴브리지 컨버터 시제품을 제작하여 실험하였다. 그림 4, 5는 각각 듀티비 PWM 제어와 위상천이 PWM 제어방법을 사용하는 컨버터의 변압기 1차측 전압과 1, 2차측 전류파형을 나타내고, 변압기에 DC 성분을 인가하기 위해 $S_1 : S_2$ 의 듀티비를 각각 0.35 : 0.335, 0.5 : 0.49로 설정하였다. 듀티비 PWM 제어에서 캐패시터는 1차측 또는 2차측에 상관없이 DC 성분에 의한 변압기 코어의 포화현상을 방지하지

만, 위상천이 PWM 제어에서는 1차측에 연결하는 경우에만 방지한다.

3. 결론

본 논문에서는 절연형 폴브리지 타입 전력변환기에서의 변압기 포화 문제에 대한 연구를 소개하였다. DC 성분에 의한 변압기 코어의 포화를 방지하기 위해 사용되는 DC 블로킹 캐패시터는 PWM 제어방법에 따라 연결 가능한 위치가 달라진다.

- 듀티비 PWM 제어방법을 사용하는 경우 DC 블로킹 캐패시터는 변압기의 1차측 또는 2차측에 직렬로 연결하여 사용이 가능하다.
- 위상천이 PWM 제어방법을 사용하는 경우 DC 블로킹 캐패시터는 변압기의 1차측에 직렬로 연결하여 사용이 가능하며, 2차측에 연결할 경우 효과가 없다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(NRF-2019R1A2C1006367)

참고 문헌

- [1] G. Ortiz, L. Fässler, J. W. Kolar and O. Apeldoorn, "Flux Balancing of Isolation Transformers and Application of "The Magnetic Ear" for Closed-Loop Volt - Second Compensation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4078-4090, Aug. 2014.
- [2] R. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Ed., New York: Springer Science & Business Media, LLC, 2001.