넓은 입력 전압 범위의 부스트 동작 기반 2-트랜스포머 위상 천이 풀 브릿지 컨버터

김윤아, 김재국
인하대학교, 전기컴퓨터공학과

Two-Transformer Phase-Shift Full-Bridge Converter With Boost Operation for Wide Input Voltage Range

Yun-Ah Kim, Jae-Kuk Kim
Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon, Korea

ABSTRACT

위상 천이 풀 브릿지(PSFB) 컨버터는 1차 측 스위치의 전압 스트레스를 클램핑하고, Zero-Voltage Switching(ZVS) 특성으로 인해 서버 전원 시스템에서 널리 사용된다. 서버 시스템은 홀드-업 시간 동안에도 안정적인 출력을 유지하기 위해 넓은 입력 전압 범위에서 동작할 수 있어야 한다. 하지만 넓은 입력 전압 범위에서 PSFB 컨버터는 듀티 비율이 제한되어 프리휠링 구간이 길어지며, 순환 전류로 인한 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 직렬 연결된 두 개의 변압기 구조(2-트랜스포머, 2-TR)를 사용하는 PSFB 컨버터에 부스트 셀이 결합된 새로운 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 홀드-업 시간 동안 부스트 동작을 수행하며, 노미널 상태에서는 큰 듀티 비율로 동작하여 프리휠링 구간을 제거한다. 또한 높은 전압 이득을 통해 변압기의 높은 턴 비를 사용하여 2차 측 전압 스트레스를 줄이고, 이를 통해 높은 효율을 제공한다. 제안된 회로의 유효성은 250-400 V 입력과 12 V 출력을 갖는 400 W 프로토타입을 통해 검증되었다.

1. 서 론

최근 기술의 발전으로 인공지능, 빅데이터, IoT 등의 활용이 증가하면서 생성되고 소비되는 데이터의 양이 급격히 늘어나고 있다. 이에 따라 전력 에너지를 효율적으로 사용하는 것에 대한 수요도 증가하고 있다. 특히 서버 시스템의 전력 소비가 증가함에 따라 고효율 DC/DC 컨버터의 필요성이 더욱 부각되고 있다.[1]

서버 시스템에서 DC/DC 컨버터는 PFC와 연결된 링크 커패시터(Link capacitor)에 저장된 에너지를 사용하며, 이 링크 커패시터의 전압이 DC/DC 컨버터의 입력 전압이 된다. 따라서 PFC의 입력 전압인 AC 라인이 끊어지면, 링크 커패시터의 전압이 감소하면서 DC/DC 컨버터의 입력전압도 시간에 따라 감소한다. 파워 서플라이는 AC 라인이 끊긴 이후에도 서버가 데이터를 저장할 수 있도록, 홀드-업 시간 동안 출력 전압을 유지해야 한다. 이러한 홀드-업 시간을 고려할 때, DC/DC 컨버터는 넓은 입력 전압 범위를 필요로 한다.[1]

위상 천이 풀 브릿지(Phase Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터는 고효율 DC/DC 컨버터로 널리 사용되고 있다. PSFB 컨버터는 1차측 스위치가 입력 전압으로 클램핑되며, Zero-Voltage Switching(ZVS)이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 프리휠링 모드에서 순환 전류가 흐르면서 도통 손실이 발생하는 한계가 있다.

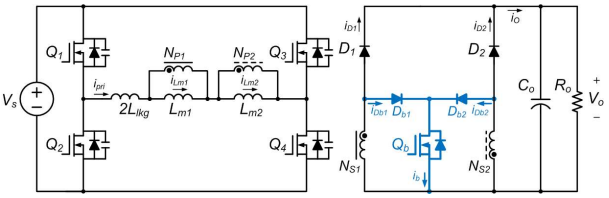


그림 1 제안의 부스트 셀이 결합된 2-트랜스포머 (2-TR) PSFB 컨버터

이러한 특징은 넓은 입력 전압 범위에서 더욱 두드러진다. PSFB 컨버터는 입력 전압 범위의 최소 전압에서 최대 듀티 비율을 기준으로 설계되기 때문에, 노미널 전압에서는 듀티 비율이 제한되어 넓은 프리휠링 구간이 발생한다.

이러한 문제점를 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 1과 같은 PSFB 컨버터의 변형 구조인 직렬로 연결된 두 개의 변압기(2-Transformer)를 사용하는 PSFB 컨버터[2]와 부스트 셀을 결합한 새로운 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 부스트 동작을 통해 더 높은 전압 이득을 제공하여 노미널 상태에서 최대 듀티 비율로 설계할 수 있다. 이를 통해 프리휠링 구간을 제거하고, 그로 인해 발생하는 순환 전류를 감소시켜 도통 손실을 줄임으로써 더 높은 효율을 달성할 수 있다.

2. 제안하는 회로 분석

2.1 제안하는 컨버터의 구성 및 특성

본 논문에서 제안하는 회로는 2-TR PSFB(2-Transformer Phase-Shifted Full-Bridge) 컨버터로, 입력 전압으로 클램핑되는 1차측 스위치의 전압 스트레스와 ZVS 등 기존 2-TR PSFB 컨버터의 장점이 동일하다. 노미널 상태에서는 기존 2-TR PSFB 컨버터와 동일하나 최대 듀티 비율로 동작하고 홀드-업 상태에서는 추가된 스위치 Q_b를 제어하여 부스트 동작한다.

2.1.1 노미널 상태 동작

제안된 회로의 노미널 상태의 동작은 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 부스트 스위치 Q_b 와 $D_{b1,2}$ 가 동작하지 않아 기존의

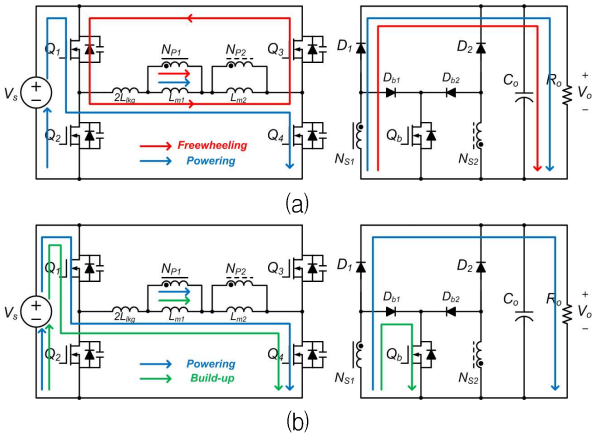


그림 2 제안하는 회로의 (a) 노미널 상태 동작 (b) 홀드-업 상태 동작

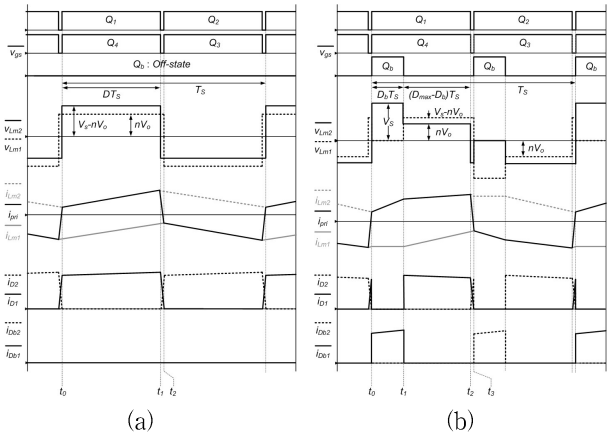


그림 3 제안하는 회로의 (a) 노미널 상태 (b) 홀드-업 상태 주요동작파형

2-TR PSFB 컨버터와 동일하게 동작한다. 최대 듀티 비율로 동작하기 때문에 그림 3(a)의 같이 프리휠링 구간이 나타나지 않는다.

2.1.2 홀드-업 상태 동작

홀드-업 상태에서는 1차측 스위치들이 최대 듀티 비율로 동작하고 부스트 스위치 Q_b가 작동하여 그림 2(b)와 같이 빌드-업 모드와 파워링 모드로 나타나는 동작을 한다. 반주기동안의 각 모드 별 동작은 다음과 같으며, 주요동작파형은 그림 3(b)와 같다. 여기서 n은 변압기 턴 비율 N_p/N_s를 의미하고, $2L_{lkg} \ll L_m$로 가정한다.

Mode 1 (t_0-t_1)

Q_b가 켜지고 V_{Lm1}이 0이 되면서 V_{Lm2}는 V_s가 되고 i_{pri}는 빠르게 증가하는 빌드-업 모드이다. Q_b가 켜져있으므로 2차측 다이오드 D_1에는 전류가 흐르지 않고, D_{b1}이 도통된다.

Mode 2 (t_1-t_2)

t_1에서 Q_b와 D_{b1}이 턴-오프되고, D_1이 도통되어 V_{Lm1}이 nV_o가 된다. 1차측의 $Q_{1,4}$가 동작하고 있으므로 V_{Lm2}에는 V_s-nV_o의 전압이 걸려 2차측으로 전달된다.

Mode 3 (t_2-t_3)

t_2에서 $Q_{1,4}$가 꺼지고 $D_{1,2}$가 모두 도통되면 $V_{Lm1,2}=\pm nV_o$가 되고, $V_{2lkg}=-V_s$가 되어 i_{pri}가 빠르게 감소한다.

2.2 전압 이득

전압 이득을 구하기 위해 노미널 상태와 홀드-업 상태에서 자화인덕터에 전압·시간균형 조건을 각각 적용하면, 아래와 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$D(V_s - nV_o) + (1-D)(-nV_o) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{nV_o}{V_s} = D \quad (2)$$

$$D_b V_s + (D_{\max} - D_b)(V_s - nV_o) - (D_{\max} - D_b)nV_o = 0 \quad (3)$$

$$\frac{nV_o}{V_s} = \frac{D_{\max}}{2(D_{\max} - D_b)} \quad (4)$$

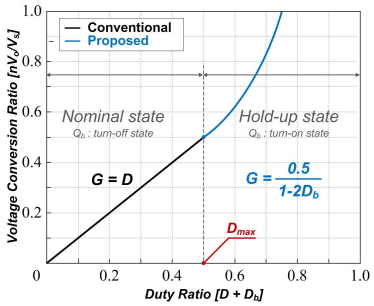


그림 4 전압 이득 곡선

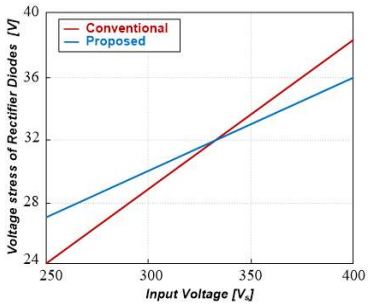
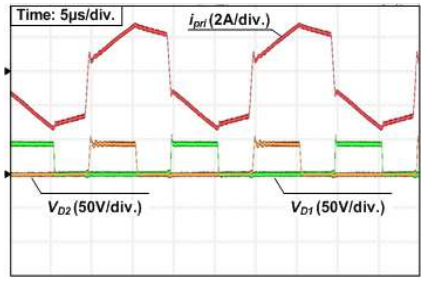


그림 5 정류기 다이오드 전압 스트레스

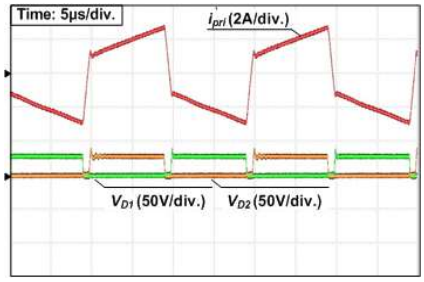
D는 컨버터의 듀티 비율을 의미하며 최대 듀티 비율 D_{max}는 0.5로 가정한다. (2)에서 얻어진 식은 기존 회로의 전압 이득 및 제안 회로의 노미널 상태에서의 전압 이득을 나타내고 제안 회로의 홀드-업 상태에서의 전압 이득은 (4)와 같다. 이를 그래프로 나타낸 그림 4에서 볼 수 있듯이 제안된 회로는 홀드-업 상태에서 부스트 동작을 통해 기존보다 추가적인 전압 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2.4 정류기 다이오드 전압 스트레스

노미널 상태에서 기존 및 제안된 회로의 정류기 다이오드 $D_{1,2}$의 전압스트레스는 V_s/n이다. 홀드-업 상태에서의 전압 스트레스는 기존 회로의 경우 동일하나 제안된 회로는 V_o+V_s/n를 갖는다. 기존 회로는 홀드-업 상태의 최소 입력 전압 $V_{s.min}$에서 최대 듀티 비율로 $n=D_{max}V_{s.min}/V_o$ 이며, 제안 회로는 노미널 상태의 전압 $V_{s.nom}$에서 최대 듀

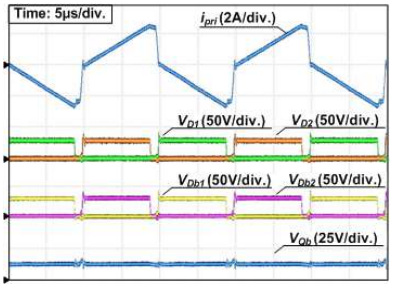


(a)

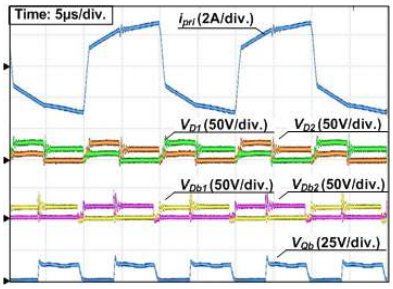


(b)

그림 6 기존 회로의 (a) 노미널 (b) 홀드-업 상태 파형



(a)



(b)

그림 7 제안 회로의 (a) 노미널 (b) 홀드-업 상태 파형

티 비율로 $n=D_{max}V_{s.nom}/V_o$이므로 기존 회로에 비해 더 높은 n을 갖는다. 따라서 그림 5와 그림 6에서 볼 수 있듯이 제안된 회로의 정류기 다이오드가 기존보다 전압 스트레스가 낮아 이점을 갖는다.

3. 실험 결과

제안하는 회로의 실현가능성과 타당성을 검증하기 위해 250-400 V 입력, 12 V/33.3 A 출력조건에서 프로토타입 컨버터를 제작하고 실험을 진행하였다. 기존의 2-TR PSFB 컨버터와 제안하는 2-TR PSFB 컨버터에 대하여 실험이 진행되었다.

그림 6 (a)와 같이 기존 회로는 제한된 듀티 비율로 인해 노미널 상태에서 넓은 프리휠링 구간이 나타난다. 홀드-업 상태에서는 그림 6(b)와 같이 최대 듀티 비율로 동작하여 출력을 제어한다. 제안 회로의 최대 듀티 비율로 동작하는 노미널 상태에서의 실험 파형은 그림 7(a) 와 같다. 그림에 볼 수 있듯이, 제안하는 컨버터의 정류기 다이오드 $D_{1,2}$가 기존의 회로보다 더 낮은 전압 스트레스를 갖는다.

그림 8은 전체 부하 범위에서 기존 회로와 제안된 회로의 효율을 비교한 것이다. 제안된 컨버터는 프리휠링 구간에서 발생하는 순환 전류를 제거하고, 1차 측 RMS 전류를 감소시켜 도통 손실을 줄이고 낮은 전압 내압을 가진 다이오드를 사용하여, 모든 부하 조건에서 높은 효율을 달성하였다.

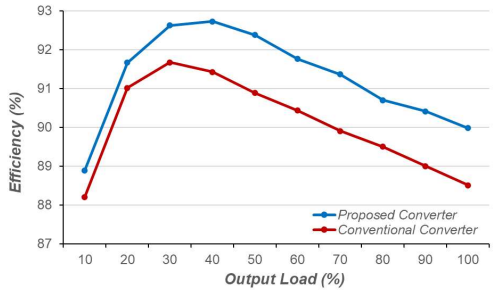


그림 8 효율 곡선

4. 결 론

본 논문에서는 부스트 셀이 결합된 새로운 2-TR PSFB 컨버터 회로를 제안하였다. 제안된 회로는 부스트 셀의 동작을 통해 기존 회로보다 높은 전압 이득을 제공하고 노미널 상태에서 최대 듀티 비율로 동작하여 프리휠링 구간을 줄이고 순환 전류를 감소시켜 대부분의 부하 조건에서 높은 효율을 달성할 수 있었다. 이러한 특성으로 인해 제안된 회로는 넓은 입력 전압 범위를 요구하고, 노미널 상태에서의 높은 효율을 목표로 하는 다양한 응용 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.00251658)

참 고 문 헌

[1] H. Wang, Y. Chen, P. Fang, Y.-F. Liu, J. Afsharian, and Z. Yang, “An LLC converter family with auxiliary switch for hold-up mode operation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4291 - 4306, Jun. 2017.

[2] G. B. Koo, G. W. Moon, and M. J. Youn, “Analysis and design of phase shift full bridge converter with series-connected two transformers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 2, pp. 411 - 419, Mar. 2004.