새로운 소프트 스위칭 방식의 인덕터 없는 풀브리지 DC-DC 컨버터

김정근, 최세완
서울산업대학교

New Inductor-less Soft-switched Full-bridge DC-DC Converter

Jeonggeun Kim, Sewan Choi
Seonul National University of Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 인덕터가 없는 비대칭 PWM 제어 방식의 풀브리지 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 위상천이 방식과 달리 순환전류가 없이 스위치 및 다이오드가 항시 에너지를 전달하여 도통손실이 작다. 전압 더블러 구조로서 다이오드의 전압정격이 작고 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없어 스너버가 필요 없다. 기존 컨버터와의 비교 분석을 수행하였으며 시뮬레이션을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 전기 자동차, UPS 시스템, 태양광 및 연료전지 시스템 등 여러 응용분야에서 승압형 DC-DC 컨버터가 사용되고 있다. 이같이 컨버터 입력이 저전압 대전류인 경우 손실이 크므로 효율을 향상시키기 위한 소프트 스위칭 기술이 필요하다[1]. 위상천이(Phase-shifted) 풀브리지 컨버터[2]는 모든 스위치가 0.5 고정 듀티로 별도의 회로 없이 ZVS가 가능하지만 변압기 누설인덕턴스가 작거나 경부하시 ZVS 가 이루어지지 않게 되며, 에너지 전달이 되지 않는 환류구간에서 순환전류에 의한 도통 손실이 발생하는 문제가 있다. 또한, 입·출력 전압차가 큰 경우 누설인덕턴스에 의한 듀티 손실이 커져 턴비가 증가하고 정류부 다이오드에 전압 서지를 막기 위한 스너버 회로가 반드시 필요하다. 2차측 필터 인덕터를 1차측으로 옮긴 위상천이 풀브리지 컨버터[3,4,5]는 정류부에 인덕터가 없기 때문에 다이오드 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없으며 스위치의 ZVS 및 ZCS 동작으로 손실을 저감할 수 있다. 하지만 이 컨버터 역시 순환전류가 발생하는 단점이 있다.

본 논문에서는 인덕터가 없는 새로운 비대칭(Asymmetrical) 상보적(Complementary) 스위칭 방식의 풀브리지 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터의 특징은 다음과 같다.

- 제안한 스위칭으로 인하여 듀티 손실이 없고 스위치가 항시 에너지 전달을 하므로 순환전류가 없어 도통손실이 작음
- 전압 더블러 구조로 다이오드 전압 정격이 작고 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없어 스너버가 필요 없음
- 보조회로 없이 변압기 누설인덕터에 의해 ZVS 턴온 스위칭
- 작은 용량의 커패시터 추가만으로 변압기 자화인덕터의 직류 오프셋 제거

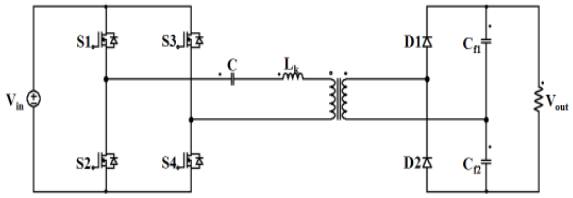


그림 1 제안하는 컨버터

2. 제안하는 컨버터의 동작원리

제안하는 컨버터는 그림 1에서 보듯이 4개의 MOSFET 스위치, 보조 커패시터, 고주파 변압기 및 전압 더블러로 구성된다. 입력 측 각 레그는 그림 2와 같이 대각선 스위치 S1과 S4, S2와 S3는 각각 동일하게 스위칭을 하며 스위치 S1과 S4의 턴온 듀티를 D, 스위치 S2와 S3의 턴온 듀티를 1-D로 하는 비대칭 상보적 스위칭으로 출력전압을 제어한다. 일반적으로 비대칭 스위칭을 하는 컨버터[6,7]는 자화인덕터의 직류 오프셋에 의한 변압기 포화를 막기 위해 추가회로가 필요 하지만, 제안하는 컨버터는 변압기에 직렬로 작은 용량의 커패시터를 추가하는 것으로 직류 오프셋이 제거할 수 있다. 또한 비대칭 상보적 스위칭 방식으로 순환전류 없이 변압기의 누설인덕터와 스위치의 내부 커패시터를 이용하여 자연적으로 ZVS를 성취할 수 있다. 2차측 정류부는 전압더블러로서 다이오드의 ZCS 턴오프 동작으로 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없어 별도의 스너버가 필요 없다.

제안하는 컨버터의 주요파형과 동작원리를 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 변압기 직렬 커패시터는 일정한 전압원으로 가정한다.

■ t_0 ~ t_1 (S1 ON, S4 ON, D1 ON)
S1과 S4가 턴온 일 때 누설 인덕터에 전압 (V_s+V_c) - V_{pri1} 가 인가되어 전류는 일정하게 증가하는 기울기를 갖게 된다. 이때 S1과 S4의 전류는 누설인덕터와 같은 기울기로 증가하게 된다. 스위치와 다이오드 전압은 입·출력 전압으로 고정이다.

■ t_1 (D1 ON)
데드타임 구간으로서 S1과 S4가 턴오프 되면서 S1, S4와 S2, S3의 내부커패시터가 각각 충·방전을 하게 되며 이때 변압기

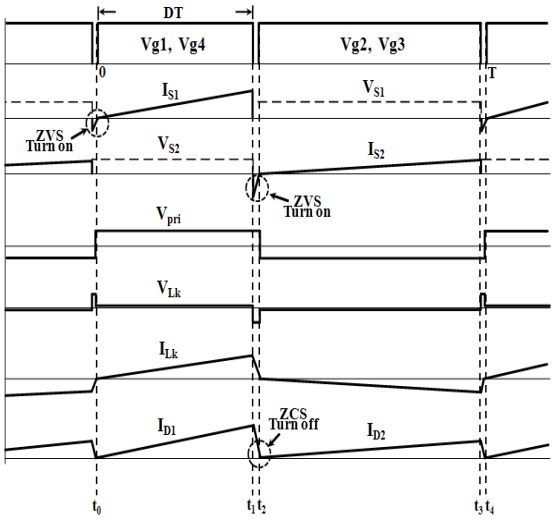


그림 2 제안하는 컨버터 주요 파형

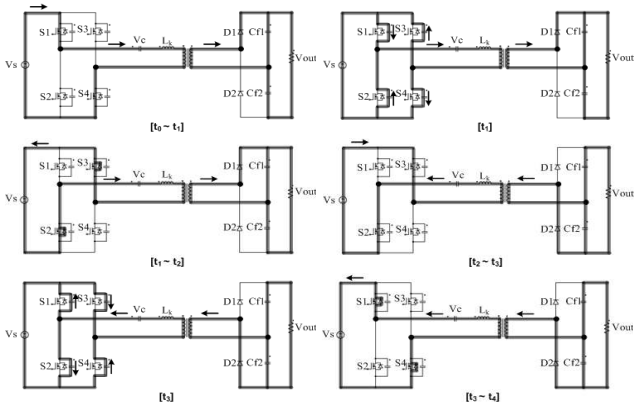


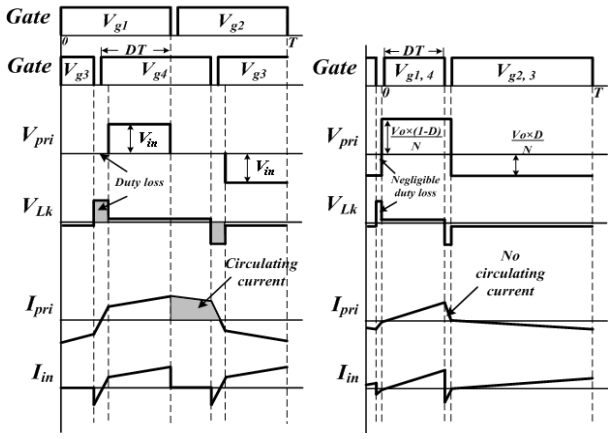
그림 3 제안하는 컨버터 동작 모드

의 누설 인덕터에 (Vs−Vc)−V_{pri} 전압이 인가되며 I_{Lk}는 감소하기 시작한다. 마찬가지로 S1과 S4, D1의 전류도 감소하기 시작한다.

■ $t_1 \sim t_2$ (S2 ON, S3 ON, D1 ON)
스위치의 내부 커패시터 충방전을 완료하며 변압기의 누설 인덕터에 인가되는 전압에 의해 I_{Lk}는 계속 감소한다. 이때 S2와 S3의 내부 다이오드를 통해 흐른다. S2와 S3에 게이트 신호가 인가되어 내부 다이오드로 흐르던 전류가 채널의 역방향으로 흐르는 동기정류방식으로 동작하며 전류는 계속적으로 감소하여 0이 된다. 다이오드 D1이 ZCS 턴오프 하여 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없다.

■ $t_2 \sim t_3$ (S2 ON, S3 ON, D2 ON)
S2와 S3 채널의 역방향으로 흐르던 전류가 0이 된 후 자연적으로 채널의 정방향으로 흐르게 되어 ZVS 턴온이 성취된다. 변압기의 누설 인덕터에 (Vs−Vc)+V_{pri} 전압이 인가되며 I_{Lk}는 역방향으로 증가하기 시작한다. 마찬가지로 S1과 S4, D1의 전류도 증가하기 시작한다.

■ $t_3 \sim t_4$ (S1 ON, S4 ON, D1 ON)
동작모드 $t_1 \sim t_2$와 동일하다.



(a) 위상천이 풀브리지 컨버터 (b) 제안하는 컨버터

그림 4 기존 컨버터와 제안하는 컨버터 주요 파형 비교

그림 4에 위상천이 풀브리지 컨버터와 제안하는 컨버터의 주요 파형을 보여준다. 그림 4(a)에서 보듯이 위상천이 방식은 2차측 정류부에 필터인덕터가 있어서 다이오드 전류(Commutation) 동작으로 인해 변압기 전압이 0V가 되어 에너지 전달이 이루어지지 않는 듀티 손실이 존재하며 입·출력 전압차가 커 턴비가 큰 응용일수록 이 현상이 두드러진다. 제안하는 컨버터는 그림 4(b)에서 보듯이 2차측 정류부가 전압더블러 구조로서 다이오드의 전류 동작이 없으므로 듀티 손실이 거의 없다. 또한 입력전류 파형에서 보듯이 위상천이 방식과 달리 항시 에너지가 전달되므로 순환전류가 없어 도통손실이 작다. 특히 연료전지와 같은 응용에서 입력전압이 높은(부하가 작은) 경우 위상천이 방식은 순환전류가 크지만 제안하는 방식은 순환전류가 없으므로 경부하 시 손실이 작다.

3. 기존 컨버터와의 비교

기존의 위상천이 풀브리지 컨버터와 제안한 컨버터를 다음의 동일한 사양으로 설계한 후 주요소자의 정격을 표 1에서 비교하였다.

·V_{in}: 35 ~ 55V ·V_{out}: 360V ·Power: 1kW
·f_s: 70kHz ·ΔI_{Lf}: 10% ·ΔV_{out}: 3%

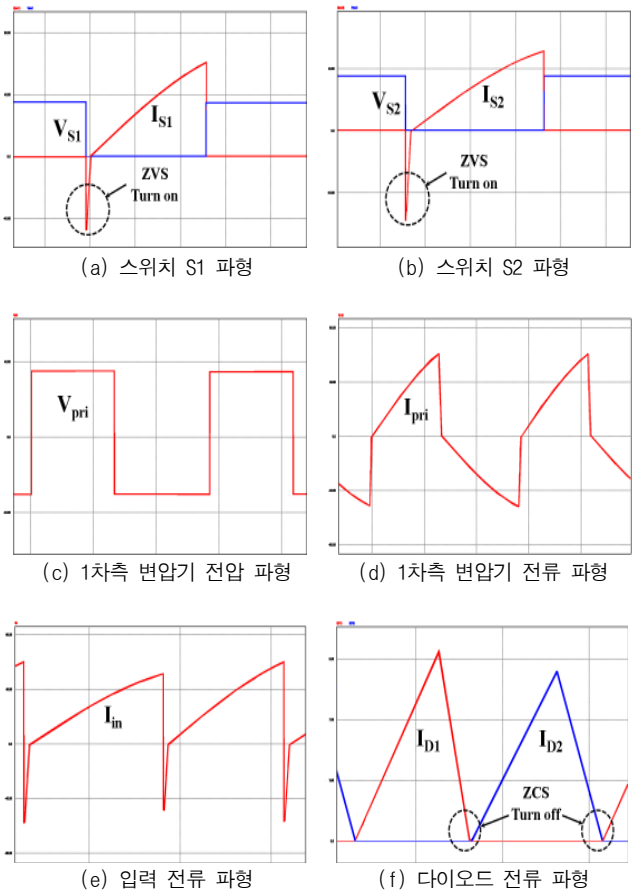
표 1에서 보듯이 메인 스위치의 정격은 제안하는 컨버터와 기존 컨버터가 같은 것을 알 수 있다. 2차측 다이오드의 전압 정격에서 제안하는 컨버터는 출력 전압으로 결정되어 기존 컨버터보다 약 2.3배 낮은 것을 알 수 있다. 이는 소자 선정 시 큰 장점이라 하겠다. 또한 제안하는 컨버터의 변압기 턴비는 1 : 5로 기존 컨버터 보다 훨씬 작고 VA정격도 감소되었음을 알 수 있다.

표 1 주요소자 정격

		기존 컨버터	제안하는 컨버터
메인 스위치	V_{pk}	55 V	55 V
	I_{rms}	25 A	25 A
다이오드	V_{pk}	855 V	360 V
	I_{pk}	3.5 A	8 A
변압기	턴 비	1 : 12	1 : 5
	VA	1427 VA	1121.5 VA

4. 시뮬레이션

제안하는 컨버터의 주요 파형을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)와 (b)는 메인 스위치의 ZVS 턴온 파형이다. 그림5(c)와 (d)는 변압기 1차측 전압, 전류를 나타낸 그림으로 듀티 손실과 순환 전류가 없는 것을 알 수 있다. 그림5(e)와 (f)는 각각 입력 전류와 다이오드 전류 파형이다. 제안하는 컨버터는 항시 에너지를 전달하는 것을 알 수 있으며 다이오드는 ZCS 턴오프 동작이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 제안하는 컨버터의 주요 특징을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.



(a) 스위치 S1 파형 (b) 스위치 S2 파형

(c) 1차측 변압기 전압 파형 (d) 1차측 변압기 전류 파형

(e) 입력 전류 파형 (f) 다이오드 전류 파형

그림 5 제안하는 컨버터 시뮬레이션 주요 파형

5. 결 론

본 논문에서는 새로운 비대칭 상보적 스위칭 방식의 인덕터가 없는 풀브리지 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 기존 위상천이 방식의 풀브리지 컨버터와 달리 듀티 손실이 없고 스위치가 항시 에너지 전달을 하므로 순환전류가 없어 도통손실이 작으며 연료전지와 같은 응용에서는 경부하 시 높은 효율 달성할 수 있다. 2차측은 전압 더블러 구조로 다이오드 전압 정격이 작고 역방향 회복에 의한 전압 서지가 거의 없어 스너버가 필요 없다. 제안한 컨버터는 승압비가 크고 입력변동이 큰 응용에서 더욱 유리하다고 하겠다. 제안하는 컨버터의 동작원리와 기존방식과의 비교 분석을 수행하였으며 향후 시험에 의한 검증을 하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] 최세완, “연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술”, *전력전자학회지*, 제8권, 제4호, pp.30-35, 2003

[2] Sabate. J.A., Vlatkovic. V., Ridley. R.B., Lee, F.C., Cho, B.H., “Design considerations for high voltage high power full bridge zero voltage switched PWM converter”, *IEEE APEC*, pp. 275-284, March 1990

[3] Chen Zhao, Xinke Wu, Wei Yao, Zhaoming Qian, "Synchronous rectified Soft Switched Phase Shift Full Bridge converter with primary energy storage inductor", *IEEE APEC*, pp.581-586, Feb. 2008

[4] Junming Zhang, Fan Zhang, Xiaogao Xie, Dezhi Jiao, Zhaoming Qian, "A novel ZVS DC/DC converter for high power application", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, Issue 2, pp.420-429, March. 2004

[5] Jitaru, I.D., "A 3kW soft switching DC-DC converter", *IEEE APEC*, Vol. 1, pp. 86-92, Feb. 2000

[6] Eberle, W., Yongtao Han, Yan-Fei Liu, Sheng Ye, "An overall study of the asymmetrical half bridge with unbalanced transformer turns under current mode control", *IEEE APEC*, Vol. 2, pp. 1083-1089, 2004

[7] Jiangtao Feng, Yuequan Hu, Wei Chen, Chau-Chun. W., "ZVS analysis of asymmetrical half-bridge converter", *IEEE PESC*, Vol. 1, pp. 243-247, June. 2001