

연료전지 자동차 응용을 위한 새로운 비대칭 PWM 방식의 양방향 하프브리지 컨버터

김정근, 윤창우, 최세완
서울산업대학교

A New Asymmetrical PWM Bidirectional Half Bridge Converter for Fuel Cell Vehicle Applications

Jeonggeun Kim, Changwoo Yoon, Sewan Choi
Seonul National University of Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 새로운 비대칭 PWM 제어 방식의 양방향 하프브리지 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 구조가 간단하고 넓은 듀티 범위를 가지므로 연료전지와 같은 넓은 전압변동을 가지는 응용에 적합하다. 제안한 비대칭 PWM 방식은 기존의 위상각제어 방식에 비해 스위치 및 변압기의 동작전류를 큰 폭으로 낮추었고 ZVZCS와 동기정류 방식을 적용하여 높은 효율과 전력밀도를 가질 수 있다. 기존 컨버터와의 비교 분석을 수행하였으며 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

식의 양방향 하프브리지 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 양방향 동작 모두 듀티 범위를 0에서 1까지 사용할 수 있으므로 변압기 턴비 선정을 유연하게 할 수 있어 넓은 전압범위를 갖는 연료전지와 같은 응용에 적합하다. 제안한 PWM 방식은 기존의 위상각제어 방식에 비해 스위치 및 변압기의 VA정격이 매우 작아지며 양방향 동작 시 스위치의 ZVZCS가 가능하고 동기정류 방식을 적용하여 스위치 손실 및 도통손실을 감소시킬 수 있어 효율과 전력밀도를 더욱 향상시킬 수 있다.

1. 서론

환경오염 및 석유 에너지 고갈에 대한 대책으로 최근 연료전지 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지 자동차의 전기 동력 시스템에는 연료전지와 인버터 사이의 직류 단에 배터리 연결을 위한 양방향 DC-DC 컨버터가 사용되고 있다. 저전압 배터리를 사용하는 경우에는 초기 기동 시 양방향 DC-DC 컨버터의 승압 동작으로 배터리를 방전하여 연료전지의 기동에 필요한 주변장치에 전원을 공급하며 연료전지가 동작하는 주행 시나 회생 동작 시에는 양방향 DC-DC 컨버터의 강압 동작으로 배터리를 충전하게 된다. 이와 같은 연료전지 자동차에 탑재되는 양방향 DC-DC 컨버터는 가격뿐만 아니라 고효율, 고전력밀도 및 고신뢰성의 매우 높은 성능이 요구되어 진다^[1]. 이때 양방향 컨버터 설계 시 가장 큰 제약조건은 연료전지의 넓은 전압변동과 컨버터의 큰 입·출력 전압차로 인해 컨버터의 전압전달비가 20~40배로 매우 크게 요구되는 것이다. 따라서 이와 같이 입·출력 전압 변동이 큰 응용에서는 기존의 풀브리지 및 푸시풀을 기본구조로 하는 양방향 DC-DC 컨버터로는 승·강압 동작을 만족하는 변압기 턴비 설계가 어렵다^[2,3]. 비교적 구성이 간단한 Dual Active Bridge(DAB)^[4] 컨버터 역시 전압변동 폭이 큰 연료전지와 같은 응용에서는 위상각의 변동범위가 커 무효전력에 의한 전류정격과 입·출력 리플 전류가 크게 증가하게 되어 변압기의 VA정격과 입·출력 필터 커패시터의 용량이 매우 커진다. 또한 Bidirectional Half Bridge(BHB)^[5] 컨버터는 DAB 방식에 비해 소자 수가 적고 입·출력전류 리플이 작지만 전압변동이 큰 응용에서는 이 방식 역시 위상각제어로 인하여 변압기 등 소자의 VA정격이 커진다.

본 논문에서는 새로운 비대칭(Asymmetrical) PWM 제어방

2. 제안하는 컨버터의 동작원리

그림 1에 제안하는 양방향 하프브리지 컨버터를 나타낸다. 강압 동작 시 주요파형을 그림 2에 나타내는데 이때 고전압 측 스위치로 출력전압을 제어하는 일반적인 방식과 달리 제안하는 방식은 저전압 측 스위치로 출력전압을 제어한다. 저전압 측 스위치 S3과 S4는 비대칭으로 상보적(Complementary) 스위칭을 하며 고전압 측 스위치 S1은 S3 스위치와 동시에 On을 하고 데드타임 만큼 먼저 Off를 한다. 고전압 측 스위치 S2는 S4와 동일한 스위칭을 한다.

제안하는 컨버터의 소프트 스위칭 동작을 나타내는 구간별 등가회로를 그림 3에 나타낸다. 고전압 측 스위치는 모두 ZVS 턴온이 이루어지며 저전압 측 스위치 S3은 ZVS 턴오프, S4는 동기정류 및 ZVS 턴오프와 턴오프가 이루어지는 것을 알 수 있다. 따라서 모든 스위치에서 ZVS 및 동기정류 동작을 하므로 스위치 손실을 크게 줄일 수 있다. 또한 기존의 비대칭 상보적 스위칭을 하는 하프브리지 컨버터^[6]는 변압기의 전류 불균형으로 인해 자화인덕터에 직류 오프셋이 발생하여 변압기가 쉽게 포화하는 문제가 있다. 하지만 제안하는 컨버터는 커패시터 C3와 C4의 평균전류가 0이므로 자화인덕터에 직류 오프셋이 발생하지 않는다.

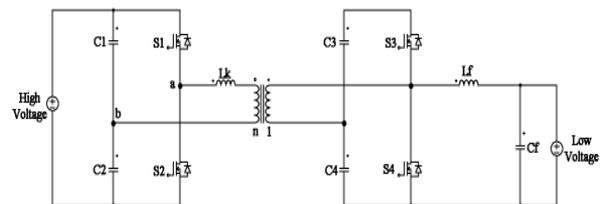


그림 1 제안하는 컨버터

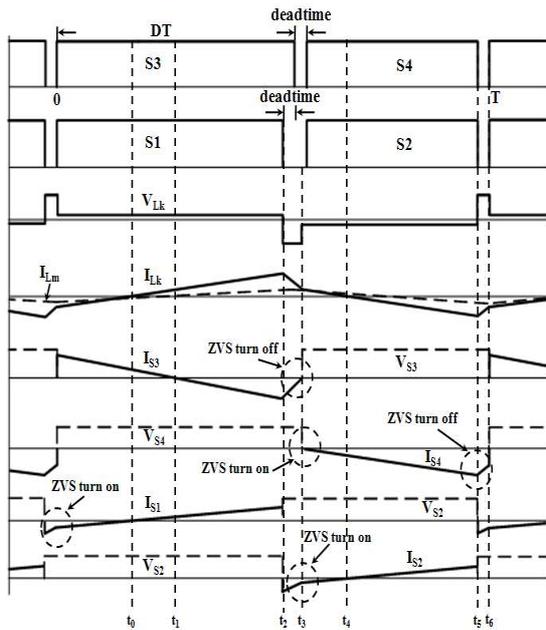


그림 2 제안하는 컨버터의 강압 동작 시 주요 파형

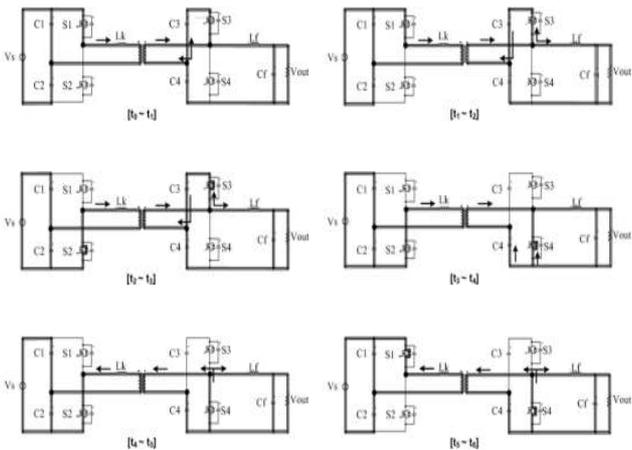
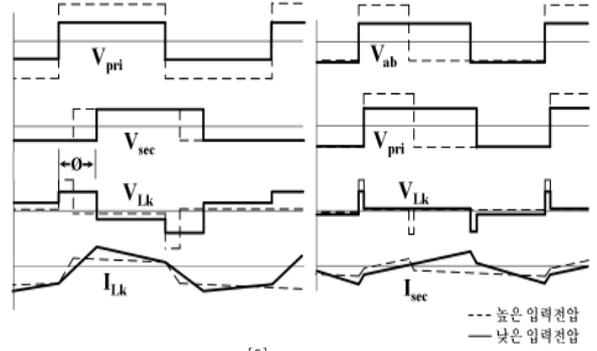


그림 3 제안하는 컨버터 강압 동작 시 구간별 동작원리

그림 4에 입력전압이 변동할 때 기존의 위상각제어 방식과 제안하는 비대칭 PWM 방식의 주요파형을 보여준다. 입력 전압이 낮은 경우 기존의 위상각제어 방식은 ϕ 가 커져 누설인덕터에 인가되는 전압의 면적이 증가하므로 전류 리플이 증가하여 저전압 측 스위치 정격이 커지지만 제안하는 PWM 스위칭 방식은 변압기 누설인덕터에 데드타임 동안 전압이 인가되므로 전류 리플이 작아진다. 따라서 제안하는 방식의 변압기의 VA 정격과 스위치의 전류정격을 작게 할 수 있다.

승압 동작시의 주요파형을 그림 5에 나타낸다. 상·하측 스위치 S3, S4는 비대칭 상보적 스위칭으로 출력전압을 제어한다. 스위치 S3과 S4는 ZVS 턴온이 이루어지며 스위치 S1과 S2는 동기정류 동작을 하고 ZCS 턴 오프 동작으로 역방향 회복으로 인한 전압 서지가 없는 특성을 가지고 있다. 제안하는 컨버터의 승강압 동작 시 소프트 스위칭과 동기정류를 표1에 정리하였다.



(a) 기존 위상각 제어^[5] (b) 제안하는 비대칭 PWM 제어

그림 4 입력전압 변동에 따른 강압 동작 시 주요 파형

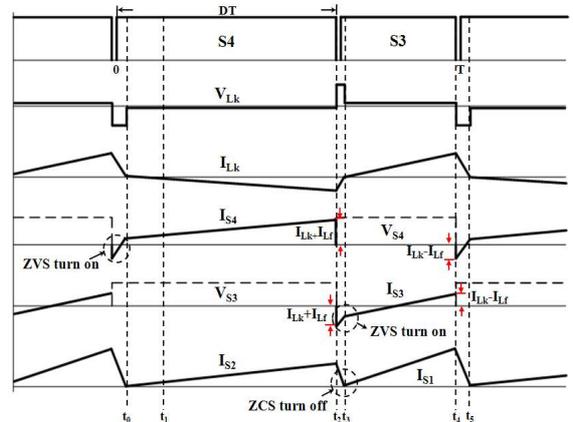


그림 5 제안하는 컨버터 승압 동작 시 주요 파형

표 1 제안하는 방식의 소프트 스위칭 및 동기정류

	S1	S2	S3	S4
강압 동작	ZVS 턴온	ZVS 턴온	ZVS 턴 오프	ZVS 턴온 및 턴오프, 동기정류
승압 동작	ZCS 턴오프, 동기정류	ZCS 턴오프, 동기정류	ZVS 턴온	ZVS 턴온

3. 기존 컨버터와의 비교

기존의 위상각제어 방식의 컨버터와 본 논문에서 제안한 비대칭 PWM 방식의 컨버터를 다음의 동일한 사양으로 설계한 후 주요소자의 정격을 표 2에서 비교하였다.

$\cdot V_{High}: 240 \sim 450V$ $\cdot V_{Low}: 12V$ $\cdot Power: 3.5kW$
 $\cdot f_s: 60kHz$ $\cdot \Delta I_{in}: 3\%$ $\cdot \Delta V_{out}: 1\%$

표2에서 보듯이 제안하는 컨버터의 고전압 스위치 전류 정격은 기존 컨버터 보다 높지만 대전류 측인 저전압 스위치 전류 정격에서 크게 감소하므로 총 도통 손실은 크게 감소한다. 또한 제안하는 방식의 변압기 턴비는 9 : 1로 위상제어 방식보다 매우 작고 kVA정격도 기존 컨버터의 약 60% 로 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 이는 제안한 방식은 기존의 방식과 달리 입력전압 변동에 따른 듀티비의 변동에 대하여 전류가 크게 증가하지 않기 때문이다.

표 2 스위칭 방식에 따른 주요소자 정격 비교

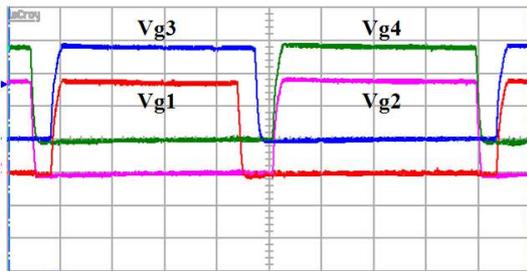
		기존의 위상각제어 ^[5]	제안하는 비대칭 PWM 제어
고전압 측 스위치	V_{pk}	450V	450V
	I_{rms} (S1, S2)	25A, 20A	38A, 27A
저전압 측 스위치	V_{pk}	28V	35V
	I_{rms} (S3, S4)	370A, 460A	80A, 350A
보조 커패시터	커패시턴스 (C3, C4)	5mF	1.5mF
변압기	턴 비	15 : 1	9 : 1
	kVA	7.7kVA	4.7kVA

4. 실험결과

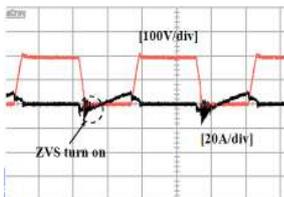
제안하는 컨버터를 다음의 사양으로 제작한 후 동작을 검증 하였다.

V_{in} : 240V V_{out} : 12V Power: 1kW f_s : 60kHz

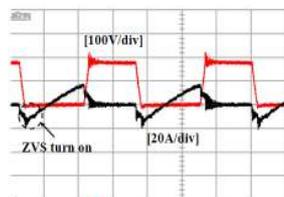
그림 6(a)는 제안하는 비대칭 상보적 스위칭 동작을 나타내며 그림 6(b), 6(c), 6(d), 6(e)는 각 스위치의 전압 및 전류 파형이다. 이들 파형에서 보듯이 그림 2에 나타난 소프트 스위칭과 동기정류 동작을 만족하는 것을 알 수 있다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 승압 동작 시 상측스위치와 하측 스위치의 ZVS 턴 온 동작을 나타내는 실험파형이다.



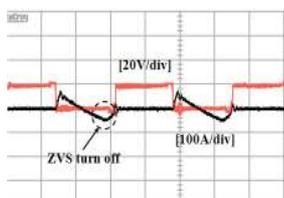
(a) 스위치 게이트 파형



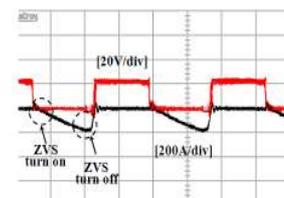
(b) 스위치 S1 파형



(c) 스위치 S2 파형

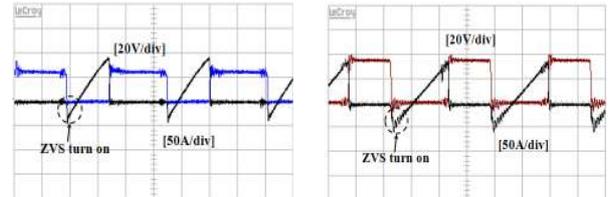


(d) 스위치 S3 파형



(e) 스위치 S4 파형

그림 6 강압 동작 시 스위치파형



(a) 상측 스위치 파형

(b) 하측 스위치 파형

그림 7 승압 동작 시 스위치 파형

5. 결론

본 논문에서는 연료전지 자동차 응용에 적합한 양방향 하프 브리지 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 새로운 비대칭 PWM 방식에 의해 기존의 위상각제어 방식과 달리 스위치 및 변압기의 VA정격이 매우 작아지며 양방향 동작 시 스위치의 ZVZCS가 가능하고 동기정류 방식을 적용하여 스위칭 손실 및 도통손실을 감소시킬 수 있어 효율과 전력밀도 측면에서 기존 방식에 비해 우수하다. 또한 넓은 듀티 범위를 가지므로 연료 전지와 같은 넓은 전압변동을 가지는 응용에 적합하다. 제안하는 양방향 하프브리지 컨버터의 동작원리와 기존 방식과의 비교 분석을 수행하였으며 1kW급 시작품으로 제안한 방식의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 최세완, "특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", 전력전자학회지, 제6권, 제1호, pp.30-36, 2003년 8월.
- [2] J.Lee, J.Jo, M.Jang, S.Choi, S Han, "A 10kW SOFC Low Voltage Battery Hybrid Power Conditioning System for Residential Use", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.21, Issue 2, pp.575-585, June. 2006
- [3] Yamamoto, K. Hiraki, E. Tanaka, T. Nakaoka, M. Mishima, T., "Bidirectional DC-DC Converter with Full-bridge Push-pull circuit for Automobile Electric Power Systems", *IEEE PESC*, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan./Feb. 2006
- [4] Kheraluwala, M.N. Gascoigne, R.W. Divan, D.M. Baumann, E.D. "Performance characterization of a high-power dual active bridge DC to DC converter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.28, Issue 6, pp.1294-1301, Nov. 1992
- [5] Peng F.Z, Hui Li, Gui-Jai Su, Lawler J.S, "A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application," *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol. 19, pp.54-65, Jan. 2004.
- [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