

고승압비를 갖는 비절연 ZVZCS CCM 부스트 컨버터

박성식, 이상원, 최세완
서울산업대학교

A Non-isolated ZVZCS CCM Boost Converter with High Voltage Gain

Sungsik Park, Sangwon Lee, Sewan Choi
Seoul National University of Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 하이브리드 자동차 및 연료전지 시스템 등 고승압 응용에 적합한 새로운 ZVZCS CCM 부스트 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 CCM에서도 ZVS 턴온이 가능하며 다이오드도 ZCS 턴오프 동작으로 역방향 회복에 의한 서지가 없다. 또한 모든 소자의 전압정격과 수동소자의 부피는 기존 ZVT 컨버터에 비해 매우 작다. 메인 스위치는 듀티 제한이 없고 승압비는 기존 부스트 컨버터의 약 2배이다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 설명하였고 이론적 해석과 시뮬레이션 및 실험파형을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 하이브리드 자동차 및 연료전지 시스템 등 여러 대전력 응용분야에서 부스트 컨버터의 필요성이 증대되고 있다^[1,2].

대전력 응용에서 부스트 컨버터는 승압비가 커지면 높은 전류정격으로 인해 스위치 및 다이오드의 전류 스트레스가 커져 역방향회복 특성에 의한 다이오드 스위칭 손실등의 문제로 스위칭주파수 제한이 있어 고효율 및 고밀도화를 달성하기 어렵다. 따라서 소프트 스위칭을 성취하는 CCM 부스트 컨버터가 요구되는데 ZVS-QRC, ZVS-QSW 등 기존의 소프트 스위칭 CCM 부스트 컨버터^[3-6]는 소프트 스위칭을 성취하기 위해 소자의 전압과 전류 스트레스가 커져 도통손실이 증가하는 문제점이 있어 대전력 응용에서는 사용이 어렵다^[7].

ZVT 컨버터는 스위치와 다이오드의 전압, 전류 스트레스 증가 없이 소프트 스위칭을 성취하는 장점이 있다. 하지만 보조회로에서 원하지 않은 공진이 발생하여 공진을 완화시키는 추가회로가 필요하므로 회로가 복잡해지고 비용이 증가하게 된다. 또한 보조 스위치가 하드스위칭을 하며 메인 스위치의 듀티 제한으로 인하여 컨버터의 승압비가 감소하는 단점이 있다^[8].

본 논문에서는 하이브리드 자동차 및 연료전지 시스템의 고승압 응용에도 적합한 새로운 ZVZCS CCM 부스트 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 인덕터 전류가 CCM 에서도 스위치의 ZVS 가능함.
- 다이오드의 ZCS 턴오프 동작으로 역방향회복에 의한 서지 발생이 거의 없음.
- 모든 소자들의 전압정격과 수동소자들의 부피가 작아짐.
- 승압비가 부스트 컨버터의 약 2배임.

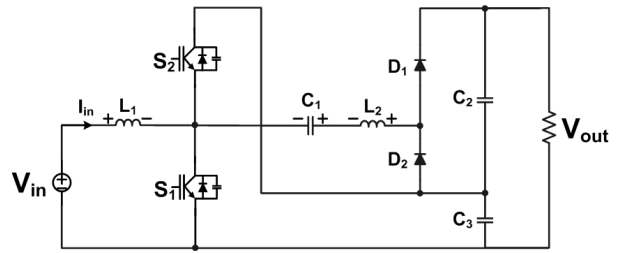


그림 1. 제안하는 DC-DC 컨버터

2. 제안한 컨버터의 동작원리

제안한 컨버터는 그림 1과 같이 필터 인덕터 L_1 과 2개의 스위치, 보조 회로로 구성되며 보조 회로는 보조 커패시터 C_1 , 보조 인덕터 L_2 , 그리고 직렬 연결된 전압 더블러(Voltage Doubler)로 구성되어 있다. 스위치 S_1 과 S_2 는 그림 2와 같이 비대칭으로 출력전압을 제어하고 상보적(Complementary) 스위칭에 의해 필터 인덕터와 보조 인덕터, 스위치의 내부 커패시터를 이용하여 DCM 에서 뿐만 아니라 CCM 에서도 자연스럽게 ZVS를 성취할 수 있다. 또한 그림 2에서 보듯이 다이오드 전류는 출력 커패시터의 충방전에 의해 ZCS 턴오프 스위칭이 이루어지기 때문에 역방향회복에 의한 서지 현상이 거의 발생하지 않는다.

제안한 컨버터의 승압비는 식(1)과 같다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{1-D_{eff}} \quad (1)$$

여기서 D_{eff} 는 유효 듀티이며 제어회로에서 결정된 듀티 D 는 다음과 같다.

$$D = D_{eff} + \Delta D \quad (2)$$

ΔD 는 인덕터 전류 I_{L2} 에 의해 발생하는 듀티 손실이며 다음과 같다.

$$\Delta D = \frac{L_2 \cdot I_{L2, pk} \cdot (1-D) \cdot f_s}{V_{in}} \quad (3)$$

듀티 손실 ΔD 는 인덕터 L_2 의 인덕턴스가 작으면 감소하지만 메인 스위치 S_1 의 ZVS 영역 또한 감소하게 된다. 따라서 메인 스위치의 스위칭 손실과 듀티 손실에 의한 승압비를 고려하여 적절히 인덕턴스를 설계해야 한다.

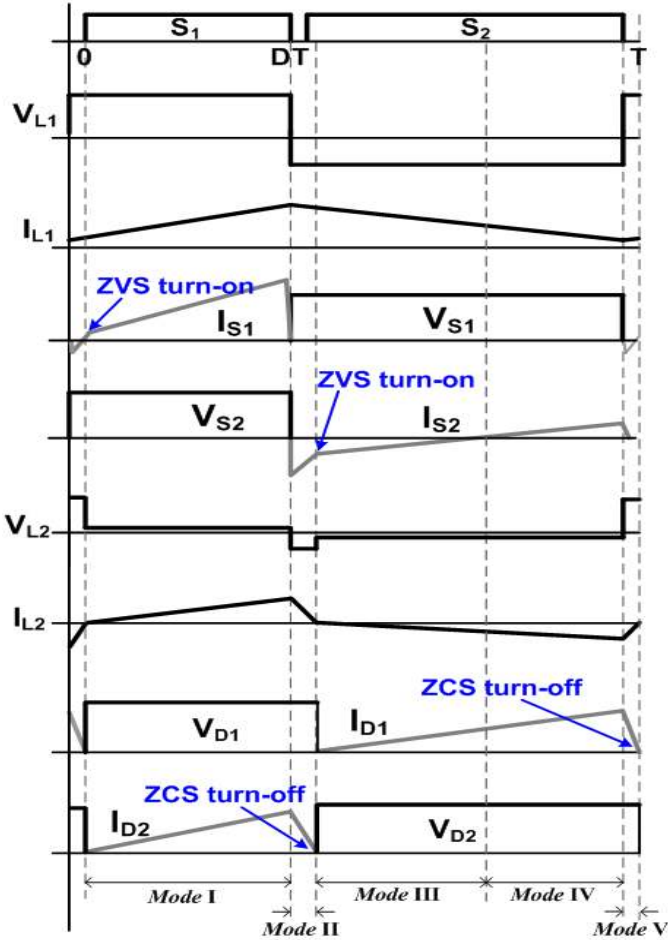


그림 2. 제안하는 컨버터의 주요 파형

또한 커패시터 전압 V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} 는 각각 다음과 같다.

$$V_{c1} = \frac{1}{1-D_{eff}} V_{in} \quad (4)$$

$$V_{c2} = \frac{1}{1-D} V_{in} - \Delta V \quad (5)$$

$$V_{c3} = \frac{1}{1-D_{eff}} V_{in} + \Delta V \quad (6)$$

여기서 ΔV 는 다음과 같다.

$$\Delta V = \frac{\Delta D}{(1-D_{eff})(1-2D_{eff}+D)} V_{in} \quad (7)$$

그림 3은 제안한 컨버터의 5개의 동작모드를 보여준다.

모드 1에서는 입력 인덕터 전류 I_{L1} 과 보조 인덕터 전류 I_{L2} 가 스위치 S_1 로 흐르고 있다. 모드 2가 시작 될 때 스위치 S_1 이 턴오프 하면서 스위치 S_2 의 내부 커패시터가 $I_{L1}+I_{L2}$ 의 전류로 방전하게 된다. 따라서 스위치 S_2 는 전부하에서 ZVS 턴온이 가능하다. 또한 다이오드 D_2 가 ZCS 턴오프가 이루어지기 때문에 역방향회복에 의한 서지 현상이 거의 발생하지 않는다. 모드 5가 시작 될 때 스위치 S_2 는 턴오프 되고 메인 스위치 S_1 의 내부 커패시터는 $-I_{L2}-I_{L1}$ 의 전류로 방전하게 된다. 따라서 메인 스위치 S_1 의 ZVS 턴온은 L_1 의 인덕턴스가 작거나 L_2 의 전류 리플이 커질 때 쉽게 성취된다.

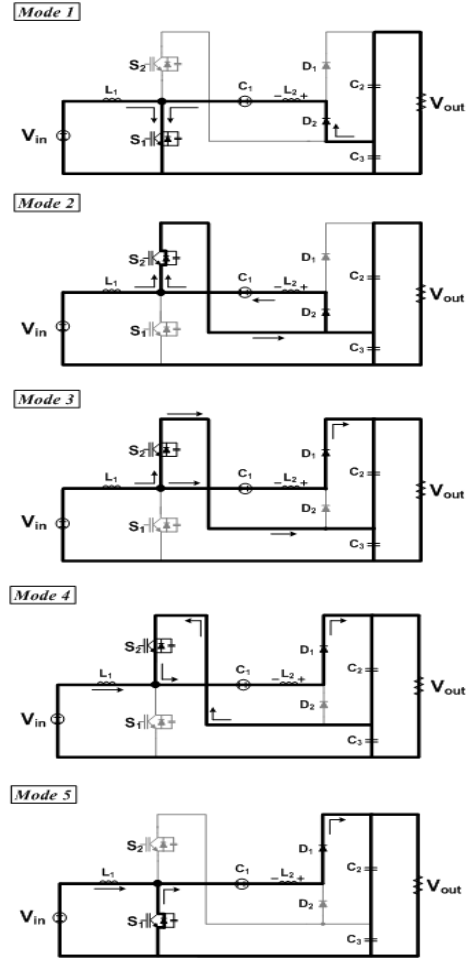


그림 3. 제안하는 컨버터의 동작모드

3. 기존 컨버터와의 비교

본 장에서는 제안한 컨버터와 기존의 ZVT 컨버터를 다음의 동일한 사양으로 설계한 후 특징 및 정격을 비교하였다.

$$\begin{aligned} \cdot P_{out} &= 50\text{kW} & \cdot V_{in} &= 250 \sim 450\text{V} & \cdot V_{out} &= 600\text{V} \\ \cdot \Delta I_{in} &= 10\% & \cdot \Delta V_{out} &= 3\% & \cdot f_s &= 15\text{kHz} \end{aligned}$$

위 사양으로 설계한 각 컨버터의 소자정격을 표 1에 비교하였다. 기존 ZVT 컨버터의 소자 전압정격은 출력전압과 같지만 제안한 컨버터는 보조회로에 의해 전압이 양분되므로 소자의 전압정격이 매우 낮게 나타난다. 따라서 제안한 컨버터는 스위치 $R_{DS(ON)}$ 과 다이오드 역방향 회복시간이 작은 소자를 선정할 수 있으므로 손실을 저감할 수 있다.

제안한 컨버터는 출력 커패시터가 2개이므로 출력 커패시터의 에너지량이 기존 ZVT 컨버터보다 약간 크지만 다른 수동 소자의 에너지량은 기존 ZVT 컨버터보다 매우 작다. 제안한 컨버터의 입력 인덕터는 작은 전압이 인가되므로 작은 인덕턴스로 입력 리플을 만족할 수 있다. 또한 소프트 스위칭을 위해 부분 공진을 사용하는 기존 ZVT 컨버터는 보조 인덕터의 전류정격이 제안한 컨버터보다 매우 크다.

표. 1. 주요 소자 정격 비교

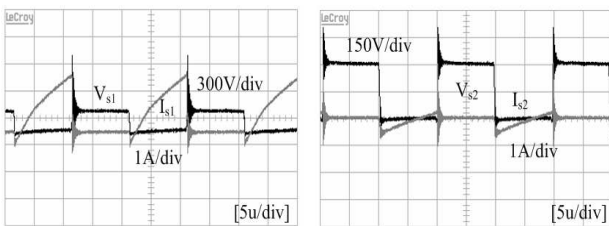
		ZVT 컨버터[7]	제안한 컨버터
스위치	V_{pk}	610V	413V
	I_{pk}	696A	552A
	$P_o/(V_{pk} \cdot I_{pk} \cdot q)$	0.05	0.11
다이오드	V_{pk}	610V	196V
	I_{pk}	200A, 690A	265A, 344A
	$P_o/(V_{pk} \cdot I_{pk} \cdot q)$	0.09	0.42
출력 커패시터	커패시턴스	200 μ F	400 μ F \times 2EA
	V_{pk}	610V	196V, 413V
	$CV^2(PU)$	1	1.12
입력 인덕터	인덕턴스	500 μ H	350 μ H
	I_{rms}	200A	200A
	$LI^2(PU)$	1	0.7
보조 커패시터	커패시턴스	7 μ F	50 μ F
	V_{pk}	610V	196V
	$CV^2(PU)$	1	0.74
보조 인덕터	인덕턴스	10 μ H	10 μ H
	I_{rms}	296A	190a
	$LI^2(PU)$	1	0.41

4. 실험 결과

제안한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 다음의 설계 사양으로 제작한 후 동작을 검증하였고 실험파형을 그림 4(a) ~ (d)에 나타내었다.

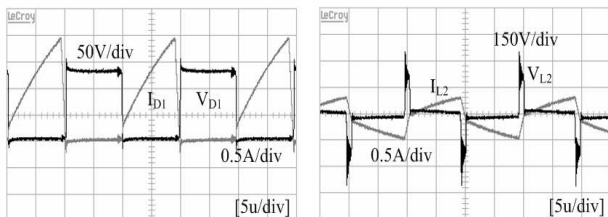
$$P_{out} = 1kW \cdot V_{in} = 100V \cdot V_{out} = 400V \cdot f_s = 50kHz$$

그림 4(a)와 (b)에서는 인덕터 전류가 CCM일 때 스위치 S_1 , S_2 가 ZVS 턴온이 성취되는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)는 출력 커패시터의 충방전에 인한 다이오드 ZCS 턴오프 스위칭을 보여준다. 그림 4(d)는 보조 인덕터 L_2 의 전압과 전류를 나타낸다.



(a) 스위치 전압(V_{s1})과 스위치 전류(I_{s1})

(b) 스위치 전압(V_{s2})과 스위치 전류(I_{s2})



(c) 다이오드 전압(V_{D1})과 다이오드 전류(I_{D1})

(d) 인덕터 전압(V_{L2})과 인덕터 전류(I_{L2})

그림 4. 실험파형

5. 결론

본 논문에서는 대전력 응용에도 적합한 새로운 ZVZCS CCM 부스트 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터의 동작 원리와 특징을 분석하였으며 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 제안한 컨버터는 CCM 에서도 스위치의 ZVS가 가능하며 다이오드도 ZCS 턴오프 동작으로 역방향회복에 의한 서지 발생이 없다. 또한 모든 소자들의 전압정격과 수동소자들의 부피가 작고 부스트 컨버터 승압비의 약 2배를 갖는다. 위와 같은 장점들로 인해 제안한 컨버터는 대전력 응용에서도 고효율 및 고전력밀도를 달성할 수 있다.

참고 문헌

- [1] B. Eckardt, A. Hofmann, S. Zeltner, "Automotive powertrain DC/DC converter with 25kW.dm³ by using SiC diodes", in *Proc. ECPE CIPS*, March 2008.
- [2] C. Wang, M.H. Nehrir, H. Gao, "Control of PEM fuel cell distributed generation systems", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 586–595, June 2006.
- [3] K. Liu, R. Oruganti, F.C. Lee, "Resonant switched-Topologies and characteristics", *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. PE-2, pp. 62–74, Jan. 1987.
- [4] V. Vorpe'rian, "Quasi square-wave converters: Topologies and analysis", *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 3, pp. 183–191, March 1998.
- [5] T. Mizoguchi, T. Ohgai, T. Ninomiya, "A family of single-switch ZVS-CV DC-DC converters", in *Proc. IEEE APEC*, vol. 2, pp. 1392–1398, 1994.
- [6] E. Ismail, A. Sebzali, "A new class of quasi-square wave resonant converters with ZCS", in *Proc. IEEE APEC*, pp. 1381–1387, 1997.
- [7] G. Hua, C. Leu, F.C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters", in *Proc. IEEE PESC*, pp. 55–61, 1992.
- [8] Q. Zhao, Peng Xu, F.C. Lee, "A simple and effective method to alleviate the rectifier reverse-recovery problem in continuous-current-mode boost converters", *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 16, No. 5, pp. 649–658, Sep. 2001.