

고승압비와 넓은 ZVS 영역을 갖는 비절연 DC-DC 컨버터

박성식*, 김포수*, 최세완*, 이진희**

*서울산업대학교, **효성 중공업연구소

A Non-isolated DC-DC Converter with High Step-up Ratio and Wide ZVS Range

Sungsik Park*, Pyosoo Kim*, Sewan Choi*, Jinhee Lee**

*Seoul National University of Technology,

**Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

ABSTRACT

기존의 부스트 컨버터에서는 출력 전압이 커질수록 스위치의 전압 및 전류스트레스가 커지고 다이오드 역방향회복에 의한 서지로 인해 실제 사용 가능한 승압비가 제한된다. 본 논문에서는 높은 승압을 요구하는 대전력 응용에도 적합한 새로운 비절연 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 듀티비 0.5로 약 6배의 승압비를 가지며 CCM에서도 영전압 스위칭이 가능하다. 또한 스위치 및 다이오드 전압정격이 출력 전압의 1/3로 되고 인터리빙이 가능하여 입출력 수동소자의 정격도 작다. 다이오드도 ZCS 턴오프 동작으로 역방향 회복에 의한 서지가 없다. 제안하는 컨버터의 동작원리를 설명하였고 이론적 해석과 시뮬레이션 및 실험과정을 통해 타당성을 검증하였다.

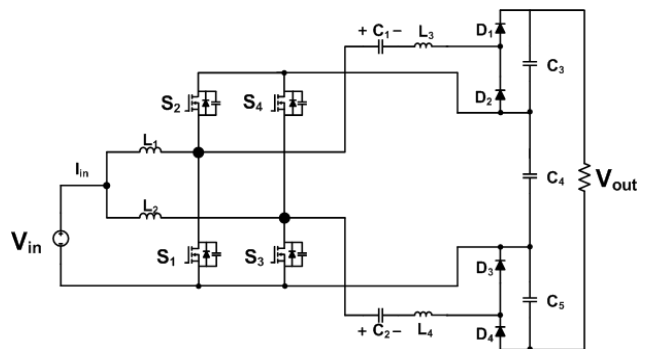


그림 1. 제안하는 DC-DC 컨버터

1. 서론

고주파 변압기를 이용하는 DC-DC 컨버터의 경우 변압기로 인한 손실, 부피 및 가격이 높아 전기적인 절연이 요구되지 않는 응용에서는 비절연형 DC-DC 컨버터가 사용된다.

구조가 간단한 기존의 부스트 컨버터는 입출력 전압차가 큰 응용에서 사용 듀티비가 커져 스위치 및 다이오드의 전압 및 전류 스트레스가 커지고 역방향회복 특성에 의한 다이오드 스위칭 손실등의 문제로 스위칭주파수 및 승압비가 제한되게 된다. 따라서 높은 승압비를 가지는 부스트 컨버터가 요구되는데, 인덕터를 커플링한 방식등 기존의 고승압 DC-DC 컨버터^[1-5]에서는 승압비가 커지면 소자의 전압과 전류 스트레스가 커지고, 입력전류 및 출력전압 리플도 커져 수동소자의 부피가 커지는 단점이 있어 대전력 응용에서는 사용이 어렵다.

본 논문에서는 높은 승압을 요구하는 대전력 응용에도 적합한 새로운 비절연 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 승압비가 부스트컨버터의 3배(D=0.5 일 때 6) 정도임.
- 인터리빙 효과로 수동소자인 L과 C의 부피가 작아짐.
- 스위치, 다이오드, 커패시터등 소자 전압정격이 1/3로 됨.
- 다이오드의 ZCS 턴오프 동작으로 역방향회복에 의한 서지 발생이 없음.
- 인덕터 전류가 CCM 에서도 스위치 ZVS 가능함.
- QSW 방식의 ZVS 턴오프 적용이 가능함.

2. 제안한 컨버터의 동작원리

제안한 컨버터는 저전압 측에 2개의 필터 인덕터, 4개의 MOSFET 스위치, 2개의 보조 커패시터, 2개의 보조 인덕터, 그리고 직렬 연결된 전압 더블러(Voltage Doubler)로 구성되어 있다. 저전압 측 레그는 그림 2와 같이 서로 180°의 위상차로 필터 인덕터의 전류를 인터리빙하기 때문에 전류 리플을 감소시킨다. 그리고 각 레그의 상하측 스위치는 비대칭으로 출력 전압을 제어하고 상보적(Complementary) 스위칭에 의해 필터 인덕터와 보조 인덕터, 스위치의 내부 커패시터를 이용하여 DCM에서 뿐만아니라 CCM 에서도 자연스럽게 ZVS를 성취할 수 있다. 고전압 측은 전압 더블러를 직렬로 구성하여 승압비를 상승시키고 소자의 전압 정격을 낮추는 역할을 한다. 또한 보조 인덕터에 흐르는 전류도 인터리빙하여 출력 커패시터로 흐르기 때문에 출력 리플을 감소시켜 출력 커패시터의 값이 작아지게 된다. 또한 그림 2에서 보듯이 다이오드에서 흐르는 전류는 출력 커패시터의 충전 전압에 의해 ZCS 턴오프 스위칭이 이루어지기 때문에 역방향회복에 의한 서지 현상이 거의 발생하지 않는다.

그림 3은 그림 2에서 스위치 S4의 ZVS 턴온 스위칭이 되는 구간별 동작모드를 보여준다. $t_1 \sim t_2$ 구간에서 S3로 흐르는 큰 전류가 S4의 내부 커패시터를 방전시키기 때문에 S2와 S4 스위치는 전부하에서 ZVS 턴온이 가능하다. $t_4 \sim t_5$ 구간에서 S4에 흐르는 전류가 S3의 내부 커패시터를 방전하기 때문에 S1과 S3 스위치는 보조 인덕터의 크기에 의해 ZVS 턴온 영역을 조절할 수 있다.

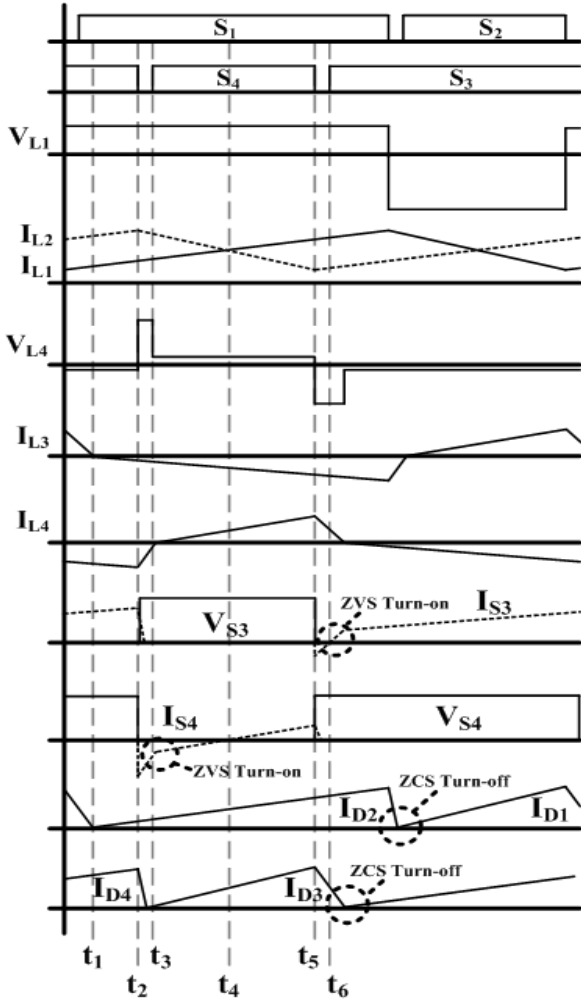


그림 2. 제안하는 컨버터의 주요 파형

그림 1에서 보듯이 고전압 측 커패시터 전압 V_{c3} , V_{c4} , V_{c5} 는 각각 다음과 같다.

$$V_{c1} = -\frac{1}{1-D} V_{in} + \frac{\Delta V}{2} \quad (1)$$

$$V_{c2} = \frac{1}{1-D} V_{in} - \frac{\Delta V}{2} \quad (2)$$

$$V_{c3} = \frac{1}{1-D} V_{in} - \Delta V \quad (3)$$

$$V_{c4} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (4)$$

$$V_{c5} = \frac{1}{1-D} V_{in} - \Delta V \quad (5)$$

여기서 $\Delta V = \frac{I_{L,peak} \cdot L \cdot fs}{1-D} \quad (6)$

이고 $I_{L3,peak} = I_{L4,peak} = I_{L,peak}$ 이며 $L_3 = L_4 = L$ 이다.

ΔV 는 인덕터 L_3 , L_4 의 전압강하에 의해 발생하는 듀티 손실로서 인덕턴스를 작게하면 듀티 손실은 감소하지만 하측 스위치 S_1 과 S_3 의 ZVS 턴온 영역이 작아진다. 따라서 하측 스위치의 ZVS 영역과 듀티손실에 의한 승압비를 고려하여 적절히 인덕턴스를 설계해야 한다. 식(3), (4), (5) 으로부터 제안한 컨버터의 승압비는 식(7)과 같다.

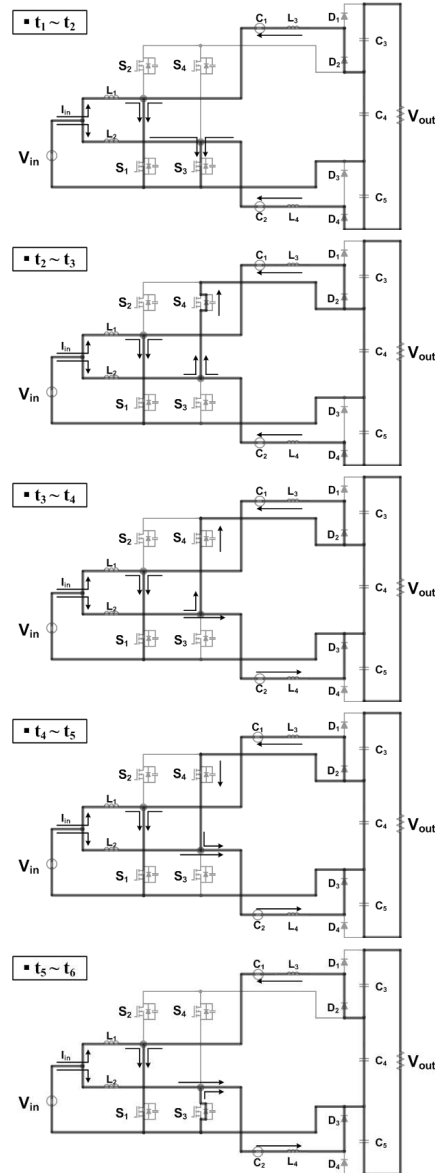


그림 3. 제안하는 컨버터의 동작모드

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{c3} + V_{c4} + V_{c5} \\ &= \frac{3}{1-D} V_{in} - 2\Delta V \end{aligned} \quad (7)$$

표. 1. 주요 소자 전압정격 비교

	부스트 컨버터	제안하는 컨버터
스위치 정격	V_{out}	$\frac{V_{out}}{3}$
다이오드 정격	V_{out}	$\frac{V_{out}}{3}$
커패시터 정격	V_{out}	$\frac{V_{out}}{3}$

표 1에서 보듯이 기존 부스트 컨버터는 출력전압에 의해 소자의 전압 정격이 결정되는데 비해 제안하는 컨버터는 직렬 연결된 커패시터로 출력전압이 나누어지므로 소자의 전압정격이 1/3로 된다. 따라서 제안하는 컨버터는 스위치의 $R_{DS(ON)}$ 과 다이오드의 역방향 회복시간이 작은 소자를 선정할 수 있는 장점이 있다.

3. 실험 결과

제안한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 다음의 설계 사양에 따라 제작된 시작품으로부터 실험파형을 그림 4(a)~(d)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \cdot \text{Power} &= 1 \text{ kW} & \cdot V_{in} &= 50 \text{ V} & \cdot V_{out} &= 400 \text{ V} \\ \cdot \Delta I_{in} &= 5\% & \cdot \Delta V_{out} &= 5\% & \cdot f_s &= 70 \text{ kHz} \end{aligned}$$

그림 4(a)는 입력전압을 보여준다. 입력전압은 50V이고 출력전압은 400V이므로 이론적인 듀티비는 $D=0.625$ 지만 델타 V에 의한 듀티손실을 고려하여 $D=0.634$ 를 사용하였다. 또한 일반적인 부스트 컨버터의 경우 스위치 양단에 출력전압 400V가 걸리게 되지만 제안한 컨버터는 그림 4(b)는 보듯이 출력전압의 1/3의 전압정격인 133V가 인가된다. 그림 4(c)는 인덕터

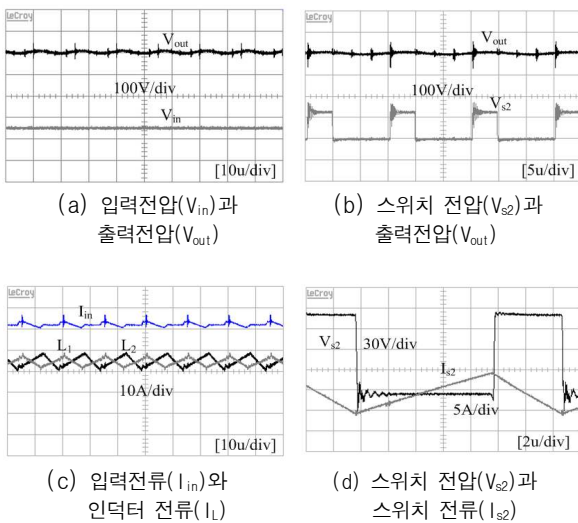


그림 4. 실험파형

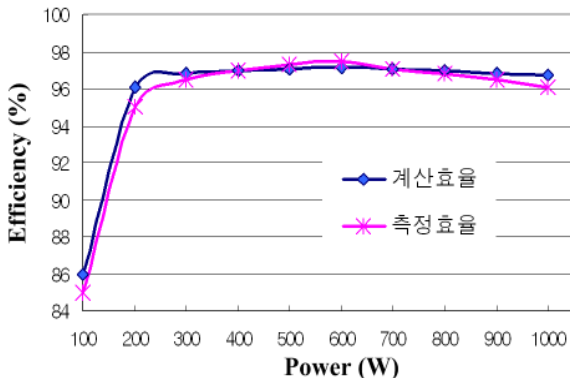


그림 5. 제안하는 컨버터의 효율

전류의 인터리빙이 되고 있는 것을 보여준다. 그림 4(d)는 스위치 전압과 스위치 전류의 보여준다. ZVS 턴온이 성취되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 제안한 컨버터의 계산효율과 측정효율을 나타낸다. 600W에서 최고 효율인 97.3%가 측정되었다. 한편 제안한 방식의 이론적인 효율도 97.1%이므로 실험적인 효율과 일치함을 확인 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 대전력 응용에도 적합한 새로운 비절연 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터의 동작 원리와 특징을 분석하였으며 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 제안한 컨버터는 부스트 컨버터 승압비의 약 3배를 가지며 CCM에서도 영전압 스위칭이 가능하다. 또한 소자의 전압정격이 출력전압의 1/3이 되고 인터리빙이 가능하여 입출력 수동소자의 정격도 작다. 다이오드도 ZCS 동작으로 역방향 회복에 의한 서지현상도 없다. 위와 같은 장점들로 인해 제안한 컨버터는 고승압 비절연 응용에서도 고효율 및 고전력밀도를 달성할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Qun Zhao, Fred C. Lee, "High Performance Coupled-Inductor DC-DC Converter", in *Proc. IEEE APEC*, pp.109-113, Feb. 9-13, 2003.
- [2] Y.Xue, L.Chang, S.B. Kjaer, Bordonau. J, Shimizu. T, "Topologies of Single-Phase Inverter for Small Distributed Power Generation : An Overview", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1305-1314, Sept. 2004.
- [3] Luo. F.L, Ye. H, "Positive Output Cascade Boost Converters", *IEE Trans. Electric Power Applications*, Vol. 151, No.5, pp.590-606, Sept. 2004.
- [4] H. Sira-Ramirez, R. Silva-Ortigoza, "Control Design Techniques in Power Electronics Devices", Springer, pp. 46-50, 2006.
- [5] Duran-Gomez. J.L, Enjeti. P.N, Palma. L, "Analysis and Evaluation of a Series-combined Connected Boost and Buck-boost DC-DC Converter for Photovoltaic", in *Proc. IEEE APEC*, March 19-23. 2006.
- [6] Hyungjoon Kim, Changwoo Yoon, Sewan Choi, "An Improved Current-fed ZVS Isolated Boost Converter for Fuel Cell Applications," in *Proc. IEEE APEC*, pp.593-599, Feb. 2008.