

고승압 인터리빙 CCM-ZVS 컨버터

박요한, 최세완, 최우진*, 이교범**
 서울산업대학교, *송실대학교, **아주대학교

High Step-up Interleaved CCM-ZVS Converters

Yohan Park, Sewan Choi, Woojin Choi*, Kyobeum Lee**
 Seoul National University of Technology, *Soongsil University, **Ajou University

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지 등 고승압·대전력 응용에 적합한 새로운 비절연 인터리빙 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 CCM에서도 스위치의 ZVS 턴온이 가능하고, 다이오드의 ZCS 턴오프 동작으로 역방향 회복에 의한 서지가 없다. 또한 기본 셀을 이용하여 병렬수와 직렬수를 적절히 선정함으로써 저가격이며 수급이 용이한 부품 사용이 가능하다. 1.5kW의 시제품을 제작하여 제안하는 컨버터의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 무정전 전원장치, 친환경자동차 및 태양광, 연료전지 등 신재생 에너지의 응용에서 시스템의 대형화에 따라 DC-DC 컨버터의 대용량 및 고승압의 요구가 증대되고 있다^[1].

기존의 인터리빙 다상 부스트 컨버터는 전류부담을 줄여 대용량화하고 필터의 사이즈 감소가 가능하지만 고승압이 요구되는 경우에는 출력전압의 상승에 따라 스위치의 전압정격도 상승하며, 큰 듀티 사용으로 다이오드 역회복에 의한 서지발생 및 제어 성능이 저하되는 문제가 있다.

기존에 제안된 고승압 컨버터로서 결합인덕터를 사용하는 방법^[2]은 누설 인덕턴스의 영향으로 인해 고효율을 달성하기 어렵고, 이를 개선하여 누설 에너지를 순환시키는 방법^[3]은 자화인덕턴스와 스위칭 소자에 높은 공진전류로 인해 전류 스트레스가 증가하는 단점을 갖는다. 또한 스위치 커패시터 방식^[4]은 인덕터를 사용하지 않고 높은 전력밀도가 가능하지만 출력전압 조정을 위해 효율이 저하되는 문제가 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 기본 셀을 사용하여 입력을 병렬로, 출력은 직렬로 연결하여 주어진 사양(입출력전압 및 용량)에 대한 최적의 토폴로지를 구성할 수 있는 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 1) 승압비를 높이기 위하여 출력의 직렬수를 증가시키면 소자의 수는 증가하나 전압정격은 낮아지고 2) 인터리빙으로 입력전류 리플 및 수동소자의 부피가 감소하며 3) CCM 에서도 스위치의 ZVS-턴온이 가능하고 4) 다이오드 ZCS 턴오프되어 역회복에 의한 서지발생이 억제되는 장점이 있다. 제안한 방식의 이러한 특징으로 기존의 고승압 방식에 비해 보다 높은 승압비와 대용량에서 적용이 가능하다.

2. 제안하는 컨버터

그림 1과 같은 기본 셀을 입력측은 병렬로, 출력측은 직렬로 연결하여 구성된 제안하는 다상 컨버터를 그림 2에 나타낸다. 여기서 N은 직렬 연결된 출력의 전압 더블러의 수, P는 각 전압 더블러에 병렬 연결된 회로의 수를 나타낸다. 따라서 승압비를 높이하고자 하는 경우 N을 늘리면 되는데 이때 소자의 수는 증가하나 각 소자의 전압정격은 작아지므로 높은 출력전압이 요구되는 경우에 유리하다. 또한 전력용량을 증대시키고자 하는 경우 P를 늘리면 되는데 이때 소자의 수는 증가하나 각 소자의 전류정격은 작아지므로 대전력이 요구되는 경우에 유리하다.

이와 같이 제안한 컨버터는 주어진 설계사양에서 입력병렬수(P)와 출력직렬 수(N)를 적절히 선정함으로써 가격 및 수급이 용이한 소자 선정이 가능하게 되어 최적 설계가 가능하다. 또한 직렬확장 및 병렬확장 시 모두 인터리빙이 적용되어 입출력 수동소자의 부피를 감소시킬 수 있다. 제안하는 컨버터의 승압비는 다음과 같다.

$$V_o = V_{C1} + V_{C3,1} + V_{C3,2} + \dots + V_{C3,N} \quad (1)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{N+1}{1-D_{eff}} \quad (2)$$

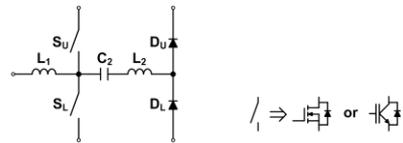


그림 1 제안하는 다상 DC-DC 컨버터의 기본 셀

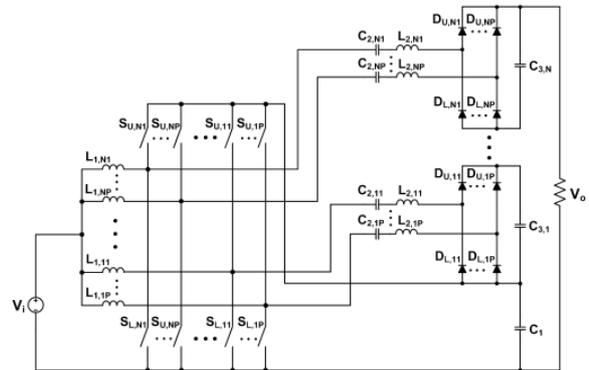


그림 2 제안하는 다상 DC-DC 컨버터 (N=직렬수, P=병렬수)

$$D_{eff} = D - \Delta D \quad (3)$$

여기서 D_{eff} 는 유효 듀티이며 제어회로에서 결정된 듀티 D 와 보조 인덕터 전류의 기울기에 의해 발생하는 듀티 손실 ΔD 의 차이이다.

그림 3은 기존 부스트 컨버터와 제안하는 컨버터의 N 증가에 따른 전압전달비 그래프를 나타낸다.

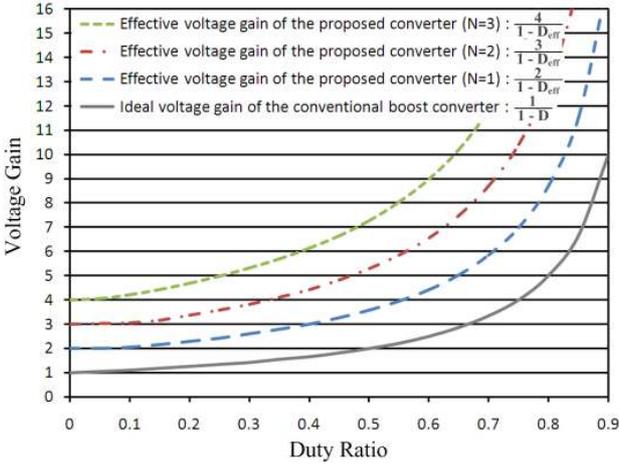


그림 3 제안하는 컨버터의 N 증가에 따른 전압전달비

그림 4는 제안하는 컨버터의 9.5배 승압일 때 $N=2, P=1$ 로 결정되고 유효 듀티는 0.71로 동작하며, 대전력 응용일 때는 그림 5와 같이 구성하여 전류 부담을 줄 일 수 있다.

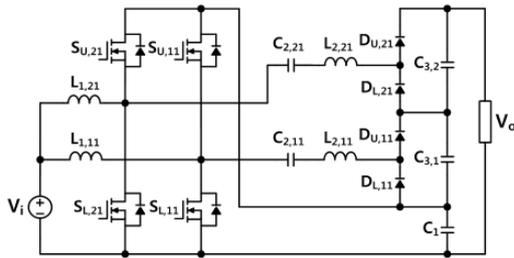


그림 4 제안하는 컨버터의 고승압(9.5배 승압)구성 예($N=2, P=1$)

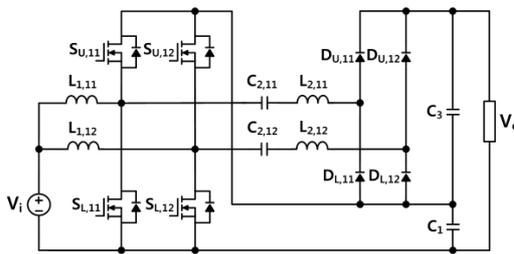


그림 5 제안하는 컨버터의 대전력 구성 예($N=1, P=2$)

그림 6과 7에 제안하는 컨버터($N=2, P=1$)의 주요파형과 동작모드를 나타내며 스위치 레그는 180° 의 위상차로 인터리빙되고 상측 스위치와 하측 스위치는 비대칭 상보적 스위칭에 의해 필터 인덕터와 보조 인덕터, 스위치의 내부 커패시터를 이용하여 DCM에서 뿐만 아니라 CCM에서도 ZVS를 성취할 수 있다. 모드 1구간에서는 필터 인덕터에 흐르는 전류($i_{L,1,11}$)와 보조 인덕터에 흐르는 전류($i_{L,2,11}$)가 하측 스위치($S_{L,11}$)로 흐르고, 모드

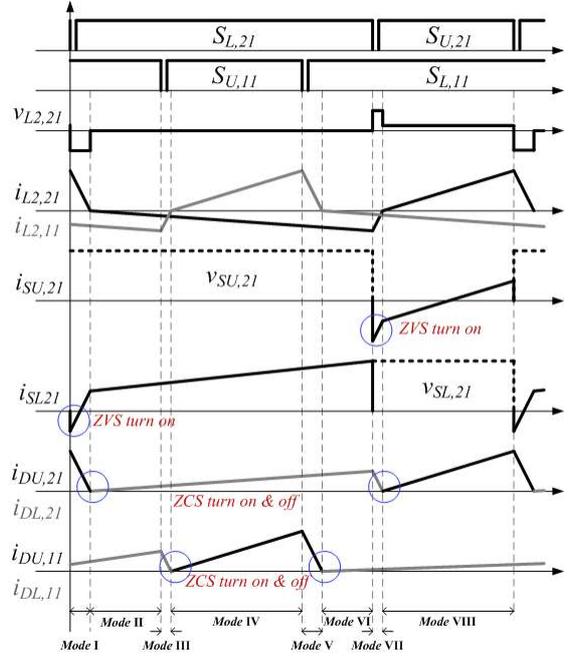


그림 6 제안하는 컨버터의 주요 파형($N=2, P=1$)

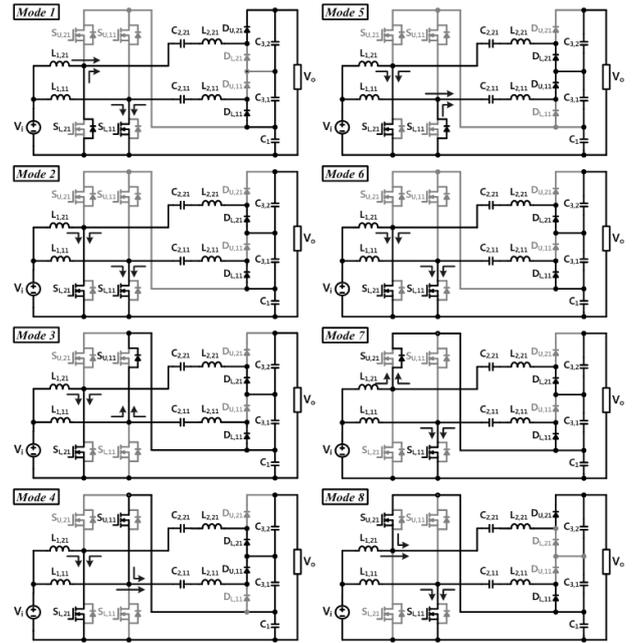


그림 7 제안하는 컨버터의 동작모드($N=2, P=1$)

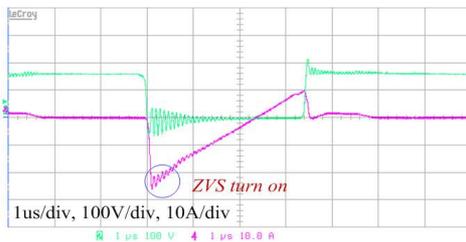
2구간에서 하측 스위치($S_{L,11}$)로 흐르는 전류가 턴오프 되면서 $S_{U,11}$ 의 내부 커패시터를 방전시키기 때문에 상측 스위치($S_{U,21}, S_{U,11}$)는 전 부하에서 ZVS 턴온이 가능하다. 모드 3구간에서는 필터 인덕터 전류($i_{L,1,11}$)와 보조 인덕터 전류($i_{L,2,11}$)의 합이 상측 스위치($S_{U,11}$)로 흐르고, 모드 4구간에서는 보조 인덕터 전류($i_{L,2,11}$)가 커져 부족한 전류를 커패시터 C_1 이 보충해주고, 상측 스위치($S_{U,11}$)에 흐르는 전류가 턴오프 되면서 $S_{L,11}$ 의 내부 커패시터를 방전하기 때문에 하측 스위치($S_{L,11}, S_{L,21}$)는 보조 인덕터의 크기에 의해 ZVS 턴온 영역이 결정된다. 또한 모드 5에서 보조 인덕터의 전류가 0까지 서서히 감소하면서 다이오드 $D_{U,11}$ 은 ZCS 턴오프 된다.

3. 실험 결과

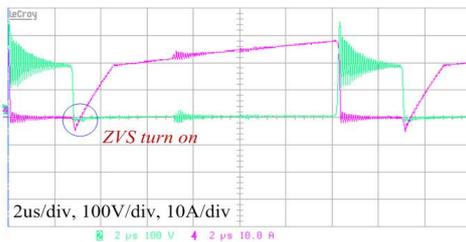
제안한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 그림 4와 같이 $N=2$, $P=1$ 인 경우 다음의 설계 사양으로 제작한 후 동작을 검증하였다.

- $P_{out} = 1.5kW$ · $V_{in} = 40V$ · $V_{out} = 380V$ · $f_s = 70kHz$
- 스위치 : IXYS IXTQ69N30P(300V, 69A, 49m Ω)
- 다이오드 : IR MUR820(200V, 8A, 25ns)
- 인덕터 : $L_1=50\mu H$ (High flux core), $L_2=4\mu H$ (MPP core)
- 커패시터 : Film capacitor 20 μF , 600V

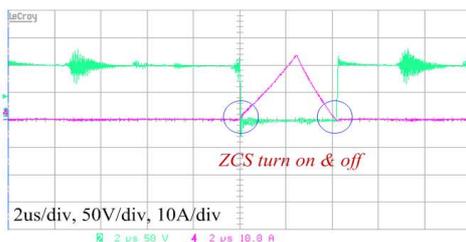
그림 8 (a)와 (b)는 인덕터 전류가 CCM일 때 스위치($S_{U,21}$, $S_{L,21}$)가 ZVS 턴온이 성취되었고, (c)와 (d)는 보조 인덕터에 의해 다이오드($D_{U,21}$, $D_{L,21}$)는 ZCS 턴온 및 턴오프가 되었다. 효율은 1kW에서 94.7%의 효율을 달성하였다.



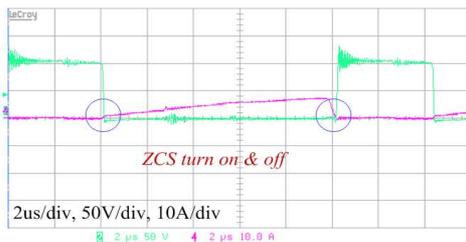
(a) 상측 스위치($S_{U,21}$) 전압과 전류



(b) 하측 스위치($S_{L,21}$) 전압과 전류



(c) 상측 다이오드($D_{U,21}$) 전압과 전류



(d) 하측 다이오드($D_{L,21}$) 전압과 전류

그림 8 제안하는 컨버터($N=2$, $P=1$)의 실험파형

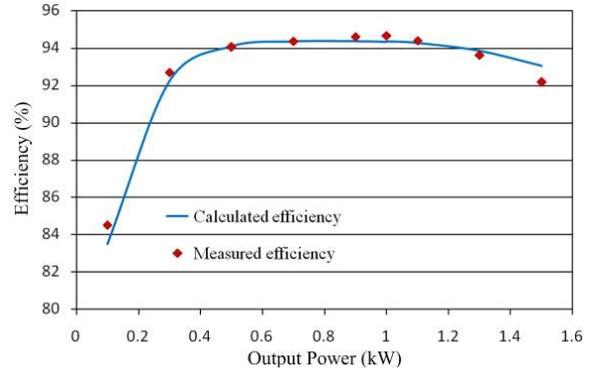


그림 9 측정효율



그림 10 1.5kW 시작품

4. 결론

본 논문에서는 고승압의 연료전지 응용에 적합한 새로운 비절연 다상 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 CCM에서도 스위치의 ZVS 턴온이 가능하며 다이오드 ZCS 턴오프 동작으로 역방향 회복으로 인한 서지가 없다. 또한 적절한 직병렬 연결로 고승압 대전력에서 가격과 수급이 용이한 부품 사용이 가능하다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (20101020300260) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] 최세완, "특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", *전력전자학회지*, 제 6권, 제 1호, pp.30-36, 2003년 8월.
- [2] K. Hirachi, M. Yamanaka, K. Kajiyama, and S. Isokane, "Circuit Configuration of Bidirectional DC/DC Converter Specific for Small Scale Load Leveling System", *in Proc. IEE Power Conversion Conf.*, vol. 2, April 2002, pp. 603-609.
- [3] Q. Zhao, F. C. Lee, "High-Efficiency, High Step-Up DC-DC Converters", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 65-73, Jan. 2003.
- [4] M. S. Makowski, "Realizability Conditions and Bounds on Synthesis of Switched-Capacitor DC-DC Voltage Multiplier Circuits", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 8, pp. 684-691, Aug. 1997.
- [5] S. Park, S. Choi, "Soft-Switched CCM Boost Converters With High Voltage Gain for High-Power Applications", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1211-1217, May 2010.