

변압기 없는 고승압 직류 컨버터용 대칭형 Cockcroft-Walton 회로

(Symmetrical Cockcroft-Walton circuit for Transformerless High Step-Up DC-DC Converter)

차대중* · 백지은 · 고광철**

(Dae-Joong Cha · Ji-Eun Baek · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

High Step-up DC-DC Converters have been demanded for renewable energy applications. Transformer or coupled inductor is generally used to boost output voltage of converters. This methods can relatively obtain high voltage than others, whereas have heavy weight and high cost. To complement these disadvantages, we studied transformerless high step-up DC-DC converter. In various transformerless topologies, Boost converters combined with Cockcroft-Walton have studied. In this paper, we proposed a symmetrical Cockcroft-Walton circuit for transformerless high step-up DC-DC converter. Finally, we simulated proposed converter to compare with existing converter. As a result, proposed converter has higher duty ratio or lower cost than existing transformerless converters which are discussed in this paper.

Key Words : Cockcroft-Walton, Voltage Multiplier, High Step-up DC-DC Converter, Renewable Energy

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근에 PV(Photovoltaic), 전기자동차, 신재생에너

지에 대한 관심이 높아지면서 고승압 컨버터(High Step-up Converter)의 필요성이 증대되고 있다 [1-3]. 승압형 DC-DC 컨버터의 종류는 주로 일반 Boost 컨버터와[4], 변압기 또는 결합 인덕터를 이용한 경우[5-6], 배전압 회로를 이용한 경우로[7] 분류할 수 있다.

그 중에서 CW(Cockcroft-Walton Voltage Multiplier)는 교류 전원을 직류 전원으로 승압할 때 많이 사용되는 회로로, X-ray, 전자현미경, 레이저, 입자가속기 등의 많은 산업시스템에 응용되어왔다[8-9]. 최근에는 위에서 언급한 신재생에너지와 같은 응용을 위해 낮은 직류 전압을 매우 높게 승압하는 용도로 사

* Main author : Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea

** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea

Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886

E-mail : kwang@hanyang.ac.kr

Received : 2015. 5. 19

Accepted : 2015. 7. 9

용되기 시작했다[10].

하지만 CW 회로의 소스는 교류전력이기 때문에, 낮은 입력의 직류전압을 인버터를 통해서 교류로 변환해야하는 번거로움이 있으며, 안정적으로 높은 승압비를 가지기 위해서 변압기를 필요로 한다[8]. 변압기를 함께 사용할 경우 시스템의 중량이 늘어나며, 고압측 절연문제가 발생한다. 물론 인버터의 스위칭 주파수를 높이면 변압기 크기는 줄어 들 수 있으나, 스위칭 손실과 변압기의 손실로 효율이 떨어지게 된다[9].

이러한 문제를 줄이기 위해서 본 논문에서는 변압기와 인버터가 없는 CW 회로를 기반으로 한 고승압 컨버터에 대하여 연구하였다.

1.2 기존 회로 분석

CW 회로 기반의 변압기가 없는 승압형 컨버터에 대한 기존 연구를 살펴보기 위해, 대표적인 두 회로의 분석을 진행하였다.

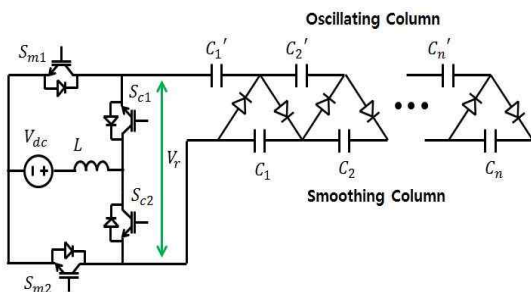


Fig. 1. Transformerless Half-Wave CW DC-DC Converter

그림 1은 변압기가 없는 Half-Wave CW DC-DC 컨버터를 보여준다[10]. 이 회로는 직류입력을 고압 직류출력으로 변환하며, 가장 큰 특징으로는 DC-DC 변환에서 인버터와 변압기를 사용하지 않고 CW에 적합하게 동작하는 것이다. 또한 일반 Boost 컨버터 처럼 CCM(Continuous Conduction Mode), DCM(Discontinuous Conduction Mode) 운영이 가능하다.

그림 2는 변압기가 없는 Full-Wave CW AC-DC 컨버터이다[11]. 이 컨버터는 그림 1에 Oscillating Column가 하나 추가되면서, 출력 리플(Voltage

Ripple)과 전압 강하(Voltage Drop)을 줄여줄 수 있다.

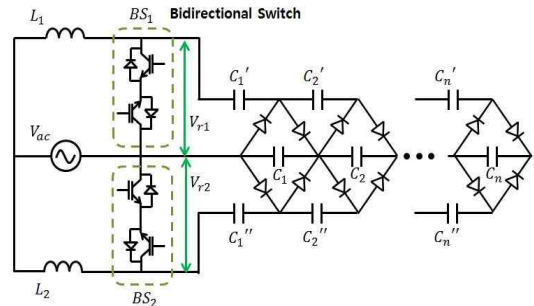


Fig. 2. Transformerless Full-Wave CW AC-DC Converter

위 모델은 기존의 변압기를 사용한 모델의 단점인 2차 측 탭의 불균형 문제도 해결할 수 있다[9]. 하지만 이 회로는 입력이 교류이기 때문에, 신재생에너지의 출력을 교류로 변환해야하는 번거로움이 있으며, 양방향 스위치(Bidirectional Switch) 제어가 필요하다.

기존의 연구된 회로 분석을 기반으로, 본 논문에서는 변압기가 없는 고승압 직류 컨버터용 대칭형 CW 회로를 제안한다. 제안하는 컨버터의 출력특성을 검증하기 위해 기존의 두 컨버터의 출력파형과 승압비를 비교하는 시뮬레이션을 하였다.

2. 변압기 없는 대칭형 배전압 회로

2.1 제안하는 회로

그림 3은 본 논문에서 제안하는 변압기가 없는 Full-Wave CW DC-DC 컨버터를 보여준다. 제안하는 컨버터는 Full-Wave CW를 위해, 스위치 S_{m2} 를 공통으로 하고 스위치를 3개와 Oscillating Column 하나를 더 추가하였다.

$C_1' - C_n'$ 과 $C_1'' - C_n''$ 은 Oscillating Column이며, 출력은 $C_1 - C_n$ 의 양단에서 나온다. Oscillating Column의 추가로 전압강하와 출력 리플을 줄일 수 있기 때문에, 회로 1의 Half-Wave CW DC-DC 컨버터 보다 더 높은 승압비를 가진다.

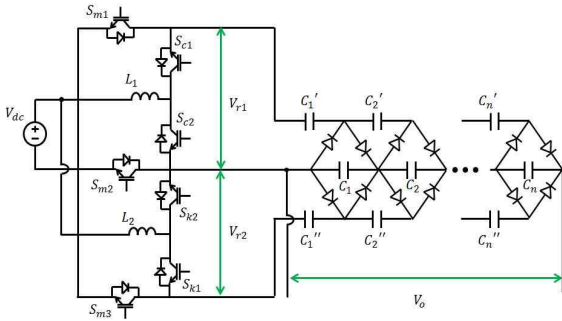


Fig. 3. Transformerless Full-Wave CW DC-DC Converter

2.2 스위치 신호제어 방법

제안하는 컨버터의 스위치 개수가 회로 1보다 많음에도 불구하고, 스위치 신호제어 기법은 회로 1의 제어 기법만큼 간단하다. 그림 4는 제안하는 컨버터의 스위치 신호와 인덕터 전류 파형을 보여준다. f_c 는 컨버터의 기본 주파수이며, D_m 의 조절로 컨버터의 출력을 제어할 수 있다. 그림에서 S_{c1} , S_{c2} , S_{m1} , S_{m2} 는 본래 회로 1에 제안된 제어기법으로, 본 논문에서는 해당 신호를 그대로 다른 한쪽에 적용함으로써 스위치 제어가 간단함을 보여준다.

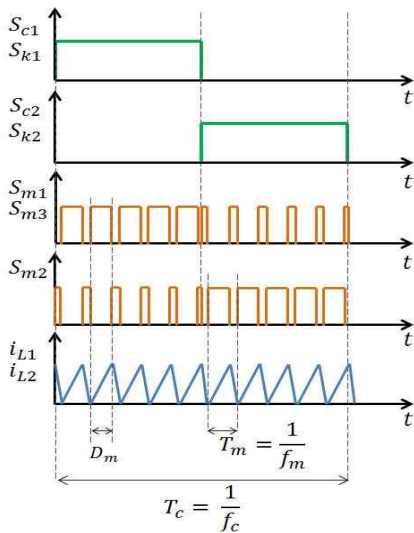


Fig. 4. Waveform of inductor current and switch signal

2.3 회로 동작 분석

그림 5는 제안한 컨버터의 회로 동작을 보여준다. CW로 입력되는 메인 주파수(f_c)는 다음 I과 II의 동작에 의한 것이며, D_m (Duty on time) 기간 동안 S_{m1} , S_{m2} , S_{m3} 에 의해서 L_1 과 L_2 에 에너지를 저장하고, $1-D_m$ 동안에 저장된 에너지가 Oscillating Column으로 출력된다. 표 1에는 회로 동작분석을 위해 각 영역 (a)-(h)의 ON 스위치를 정리하였다.

Table 1. Switch operation of proposed circuit

I. S_{c1} , S_{k1} - ON		II. S_{c2} , S_{k2} - ON	
(a)	S_{m1} , S_{m3}	(e)	S_{m2}
(b)	S_{m2}	(f)	S_{m1} , S_{m3}
(c)	S_{m2}	(g)	S_{m1} , S_{m3}
(d)	S_{m2}	(h)	S_{m1} , S_{m3}

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 회로 3(그림 3)의 성능을 비교하기 위해서 그림 1과 그림 2의 회로(각 회로 1, 회로 2)를 추가로 시뮬레이션 하였다. 다음 표 2은 각 회로의 시뮬레이션 파라미터를 보여준다.

회로 3은 본 논문에서 제안하는 회로이며, 전체 CW의 단수는 5단으로 하였다. 위 시뮬레이션 조건에서 L 은 회로 1과 회로 3의 L_1 과 L_2 의 값을 나타내며, C 는 CW의 모든 커패시터($C_1 \dots C_n$, $C'_1 \dots C'_n$, $C''_1 \dots C''_n$)의 값을 나타낸다. 또한 각 회로의 D_m 은 실질적으로 출력이 최대가 되는 지점인 0.8로 선정하였으며, 회로 2는 최대가 되는 지점이 0.5이고, 그 뒤로는 출력이 감소하기 때문에 D_m 을 0.5로 하였다. 각 회로의 입력 전압은 100V로 일정하며, 회로 2는 교류전압의 실효값을 약 100V로 하기위해, $141.4V_{peak}$ 를 설정 해주었다.

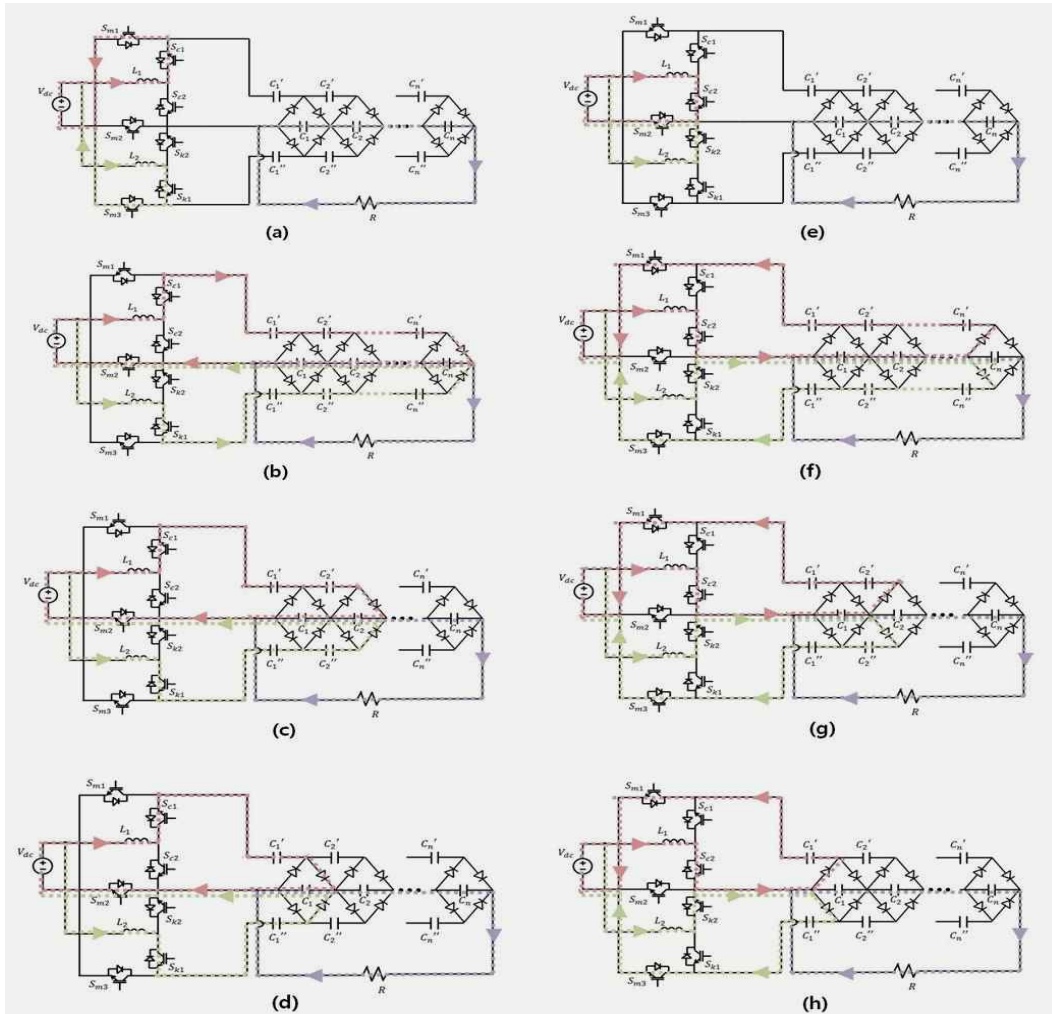


Fig. 5. Circuit conducting paths

Table 2. Simulation parameters of each circuit

	회로1	회로2	회로3*
V_{in}	100V	141.4V	100V
L	200uH	200uH	200uH
C	1uF	1uF	1uF
R	100kΩ	100kΩ	100kΩ
D_m	0.8	0.5	0.8
f_c	5kHz	5kHz	5kHz
f_m	50kHz	X	50kHz

3.2 시뮬레이션 결과

그림 6, 7, 8은 각 회로를 최대 듀티비에서 시뮬레이션한 파형을 보여준다. V_o 는 출력 전압이고, V_r 은 CW의 입력 전압을 보여준다. 회로 1의 출력은 약 6kV, 회로 2는 약 13.5kV, 마지막으로 제안한 컨버터는 약 8kV의 출력을 가지는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 대칭형 구조가 회로 1의 출력 전압을 같은 듀티비에서 더 높일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 비교적 높은 출력을 가지는 회로 2의 V_r 보

다 회로 1과 회로 3의 V_r 이 안정적으로 CW에 입력되는 것을 확인할 수 있다.

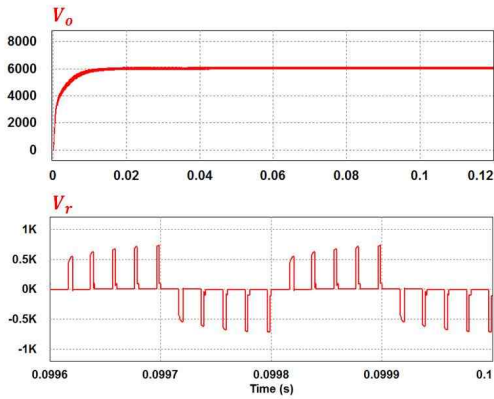


Fig. 6. Output voltage of circuit 1

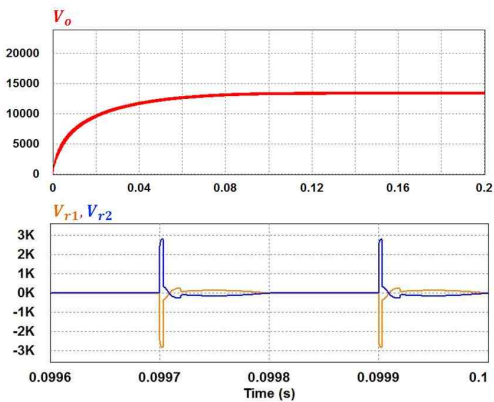


Fig. 7. Output voltage of circuit 2

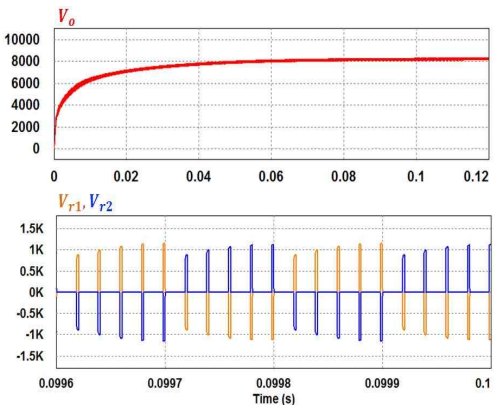


Fig. 8. Output voltage of circuit 3

— Half-Wave DC-DC Converter [회로1]
 — Proposed Converter [회로3]
 — Boost Converter
 — Full-Wave AC-DC Converter [회로2]

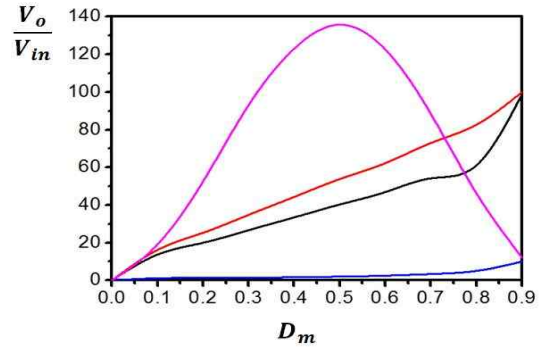


Fig. 9. Voltage gain curve of each circuit

제안한 대칭형 컨버터의 전압 이득을 비교하기 위해 각 회로의 전압 이득 곡선을 그림 9에 나타내었다. 이 이득 곡선은 기본 Boost 컨버터와 위에서 소개한 회로 1, 회로 2, 그리고 제안한 컨버터인 회로 3을 비교한 것이다.

회로 2의 이득은 0.5에서 최대가 되며, 매우 높은 이득을 가진다. 하지만, 입력 전원이 5kHz가 되기 위해서는 낮은 DC 전압을 다시 교류형태로 바꾸어주는 인버터가 필요하기 때문에, 스위치 개수도 많이 필요하고, 제어도 복잡해진다. 마지막으로, 전압 이득 곡선에서 알 수 있듯이 기존 회로 1보다 본 논문에서 제안한 회로 3의 전압 이득이 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

신재생에너지에 대한 관심이 집중되면서, 고승압 직류 컨버터에 대한 관심과 연구가 높아지고 있다. 본 논문은 낮은 직류전압을 높은 직류전압으로 승압하기 위한 컨버터에 대하여 연구하였으며, 특히 변압기와 인버터가 없는 CW 회로 기반의 컨버터를 연구하였다.

기존 연구였던 회로 1과 회로 2의 내용을 기반으로 하여, 본 논문에서는 회로 1의 출력 전압을 향상시킨 대칭형 CW 컨버터를 제안하였다. 추가적으로 회로 1-3의 출력 특성을 비교함으로써, 제안한 회로에 대한 타당성을 검증하였다.

그 결과 제안한 회로 3은 회로 1보다 전체 듀티비에 서 승압비가 높았으며, 회로 2의 입력이 AC 임을 감안 하였을 때, DC 입력인 제안한 회로가 훨씬 효과적임을 알 수 있다. 위 연구를 기반으로 좀 더 높은 승압비를 가지고, 구조가 간단한 변압기 없는 고승압 CW 컨버터를 연구할 계획이다.

References

- [1] Q. Luo, Y. Zhang, P. Sun, L. Zhou, "An Active Clamp High Step-Up Boost Converter with a Coupled Inductor", *Journal of Power Electronics*, 15 (1), pp. 86-95, 2015.
- [2] S. J. Jang, T. W. Lee, B. K. Lee, C. Y. Won, S. S. Kim, "Bi-directional DC-DC Converter Design and Control for step-up/step-down", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 20 (5), pp. 49-56, 2006.
- [3] J. S. Choi, S. Y. Oh, D. H. Chung, S. G. Song, "Development of Boost Type Bidirectional DC/DC Converter with High Efficiency For EV using an Interleave Method", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 27 (10), pp. 59-68, 2013.
- [4] D. K. Kwak, C. S. Kim, H. Y. Park, J. S. Shim, S. H. Shim, "Boost AC-DC Converter of High Power Factor and High Efficiency", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 19 (7), pp. 45-52, 2005.
- [5] S. C. Hong, S. Y. Chae, D. T. Chung, H. S. Kim, "Analysis of the Isolated Boost Converter Using Self-Driven Switch", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 24 (6), pp. 89-98, 2010.
- [6] D. H. Yoo, G. Y. Jeong, "High Efficiency Coupled Inductor Boost DC-DC Converter using a Simple Clamp Circuit", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 26 (3), pp. 31-39, 2012.
- [7] A. Ajami, H. Ardi, A. Farakhor, "A Novel High Step-up DC/DC Converter Based on Integrating Coupled Inductor and Switched-Capacitor Techniques for Renewable Energy Applications", *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (8), pp. 4255-4263, 2015.
- [8] T. Y. Ahn, Y. M. Gil, "A Study of the High Voltage Power Supply using a Sixfold Voltage-Multiplying Rectifier", *Journal of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 29 (2), pp. 19-26, 2015.
- [9] S. Iqbal, "A Hybrid Symmetrical Voltage Multiplier", *IEEE Trans. Power Electron.*, 29 (1), pp. 6-12, 2014.
- [10] C. M. Young, M. H. Chen, T. A. Chang, C. C. Ko, K. K. Jen, "Cascade Cockcroft-Walton Voltage Multiplier Applied to Transformerless High Step-Up DC-DC Converter", *IEEE Trans. Power Electron.*, 60 (2), pp. 523-537, 2013.
- [11] C. M. Young, M. H. Chen, H. L. Chen, J. Y. Chao, C. C.

Ko, "Transformerless Single-Stage High Step-Up AC-DC Converter Based on Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multiplier with PFC", *IEEE Power Electronics and Drive system*, pp. 191-196, 2011.

◇ 저자소개 ◇



차대중(車大中)

1973년 9월 26일생. 1996년 한밭대 제어계측공학과 졸업. 2009년 건축전기설비 기술사 및 프로젝트관리전문가 자격취득 (미 PMI). 2012년 한양대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대 일반대학원 전기공학과 박사과정 및 (주)한양 건축주택사업본부 기술개발팀 근무.



백지은(白智恩)

1988년 5월 16일생. 2012년 호서대 공대 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한양대 일반대학원 전기공학과 석·박사통합과정.



고광철(高光哲)

1959년 1월 31일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동경공업대학 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 1990~1995년 가천대 전기공학과 조교수. 1995~2005년 한양대 전기공학과 조교수/부교수. 2005년~현재 한양대 전기·생체공학부 교수.