

이중 출력용 AC-DC PFC 컨버터

김영재¹ · 김종수² · 정범동³ · 신동욱⁴ · 허재정[†]

(Received January 16, 2019 ; Revised April 18, 2019 ; Accepted July 15, 2019)

AC-DC power factor compensation converter for dual output

Young Jae Kim¹ · Jong-Su Kim² · Bum-Dong Jeong³ · Dong-Uk Sin⁴ · Jae-Jung Hur[†]

요약: DC 시스템의 장점은 최근 다시 검토되고 있다. 컴퓨터, LED 조명, LED TV, 세탁기 등과 같은 가전제품은 DC 전원을 사용하나 기존의 유틸리티 공급은 AC 전원이다. 본 논문에서는 새로이 떠오르는 DC 배전시스템에 적합한 이중 출력 AC-DC PFC 컨버터를 제시한다. 광범위한 DC 부하와 표준 배전 레벨의 요구에 따라 제안된 이중 출력 PFC 컨버터는 동시에 부스트와 벅 출력을 제공도록 설계되었고 정류기가 높은 역률에서 작동하도록 보장한다. 두 개의 DC 출력을 동시에 조절하는 페루프 제어에 적합한 디지털 제어 기법이 구현되었다. 제안한 컨버터의 토폴로지와 작동 원리 및 이론적 분석이 제시되어 있으며, PSIM 소프트웨어를 사용하여 유효성을 확인하였다.

주제어: PFC(역률보상), 승압변환기, 강압변환기, DC 배전

Abstract: The advantages of direct current (DC) systems are being re-examined by researchers. Modern consumer equipment such as computers, LED lights, and home appliances (for example, LED televisions and washing machines) require DC supply for their operation. However, the conventional utility supply is in the form of alternating current (AC). Hence, in this paper, a dual output AC-DC power factor compensation (PFC) converter is proposed as a prospective option for the emerging DC distribution systems. To comply with the need for a vast range of DC loads and standard distribution levels, the proposed dual output PFC rectifier was accordingly designed for providing simultaneous boost and buck outputs. Additionally, it was ensured that the designed rectifier could operate at a high power factor. An appropriate digital control technique was applied for close loop control to simultaneously regulate the two DC outputs. The topology, operating principles, and theoretical analysis of the proposed converter are presented. By using PSIM software, the validation of the converter has been verified.

Keywords: Power factor compensation, Boost converter, Buck converter, DC distribution

1. 서론

최근, 직류전원이 장점을 가지는 분야가 등장하면서 DC 배전시스템이 새롭게 각광을 받고 있다. LED 조명, 컴퓨터 뿐 아니라 LED TV, 세탁기, 믹서 등 직류전원을 사용하는 가전제품이 증가하고 있다. 그러나 공급전력은 교류 전원이므로 적절한 AC-DC 컨버터가 필수적이다. DC 부하장치가 증가할수록 요구되는 컨버터의 개수 및 전력손실이 상승하게 되고 운전효율은 감소한다[1]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. DC 배전시스템은 AC에 비해 선로 저항이 낮고, 선로 리액턴스가 없을 뿐 아니라, 동일출력에 대해 전류가 낮아 전선 크기가 감소하고, 안정성이 높으며, 설치 공간이 감소되는 등 많은 이점을 지니

고 있다. 그럼에도 불구하고 DC 배전시스템은 표준전압이 확립되어있지 않아 광범위하게 적용되지 못하고 있다.

그러므로 어떤 DC 장치도 공통적으로 사용할 수 있도록 DC 전압을 표준화하는 계획들이 추진되고 있다[2]. 그러나 하나의 표준전압을 정하더라도 이 전압이 모든 장치에 적합하다고 할 수는 없다. 즉, 저 출력 장치에 적합한 전압을 고 출력 장치에 적용하면 전류가 상승하고 부피 및 손실이 증가하므로 효율이 감소한다. 따라서 출력에 따라 고압 및 저압 두 종류의 전압을 표준화하고자 하는 움직임이 대두되고 있다. 고압 배전시스템은 중공업, 상업용 건물, 통신 및 데이터 센터 등에 대한 표준전압으로, 저압 배전시스템은 저 전력 가정용 기기 등에 사용될 수 있다.

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0519-7717>): Professor, Division of Education, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, 367, Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea, E-mail: jjheo@seaman.or.kr, Tel: 051-620-5789

1 M.S. Candidate, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: kwww@khanmail.net

2 Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4831

3 Professor, Division of Education, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, E-mail: bumdong@seaman.or.kr, Tel: 051-620-5873

4 Professor, Division of Education, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, E-mail: shindu@seaman.or.kr, Tel: 051-620-5549

단일 DC 입력-다중 DC 출력 컨버터로는 fly-back 절연형 단일입력-다중출력 컨버터가 소개되었고[3], 비 절연형으로 는 가변 단일입력-다중출력 컨버터가 발표되었다[4].

그러나 다중출력 AC-DC 컨버터에 관한 연구는 많이 진 행되지 않고 있다. DC UPS용 다중출력 AC-DC 컨버터 개 발에 대한 연구는 등장하였고[5], 네 개의 스위칭 소자를 사용하여 역률보상 및 출력 분리를 실현한 이중출력 컨버 터가 발표되었다[6].

본 논문에서는 두 종류의 전압을 출력하는 비 절연 이중 출력 AC-DC 컨버터를 제안한다. 이 컨버터의 토폴로지는 입력 AC 전압에 비해 보다 높은 전압(Boost Converter)과 보다 낮은 전압(Buck Converter) 두 종류의 안정된 직류전 압을 동시에 출력한다. 또한 입력전류의 역률을 높게 유지 함으로써 전력의 품질이 양호한 특성을 나타낸다.

2. 이중출력 AC-DC PFC 컨버터

2.1 토폴로지

본 논문에서 제안하는 이중출력 AC-DC 컨버터는 두 종 류의 안정된 직류전압을 출력한다. 하나는 입력보다 높은 전압을 출력하는 부스트 컨버터의 기능을 하고, 또 다른 하 나는 입력보다 낮은 전압을 출력하는 벅 컨버터의 기능을 한다. Figure 1은 제안한 컨버터의 기능을 보여준다.

Figure 2는 제안한 컨버터의 회로도를 나타낸다. 입력은 단상 AC 전압 (V_{in})이고 출력은 두 종류의 DC 전압(V_{o1} , V_{o2})이다. 이 컨버터는 기존의 두 컨버터, 즉 전파정류회로 를 장착한 역률보상용 부스트 컨버터와 이와 동기화된 벅 컨버터가 합성된 형태를 보여준다.

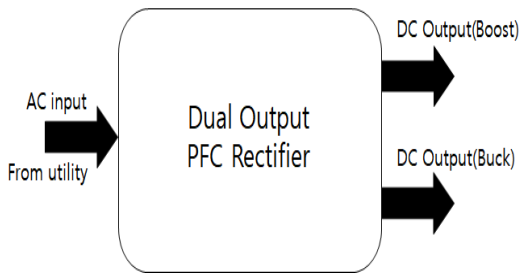


Figure 1: Function of the proposed dual output AC-DC con- verter

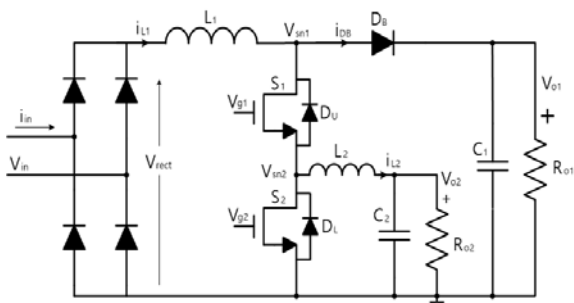


Figure 2: Circuit schematic of dual output PFC rectifier

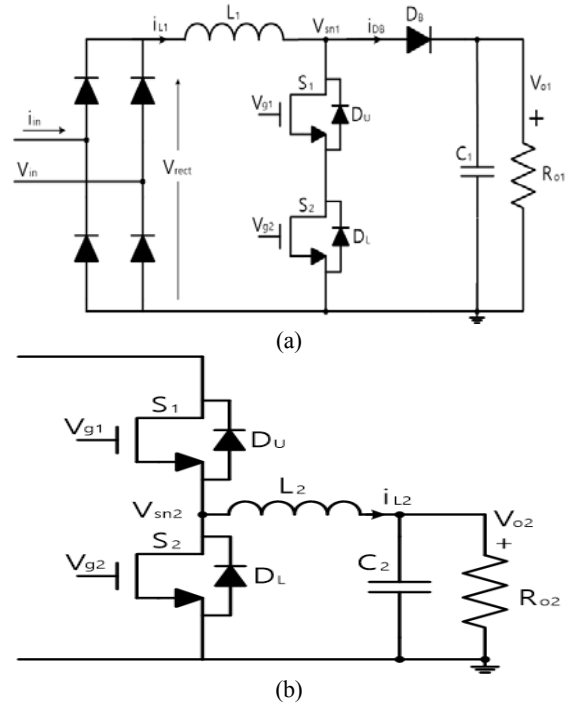


Figure 3: Constituent converters of dual output PFC rectifier (a) boost PFC stage with the active replaced by two switches connected in series and (b) synchronous buck con- verter

Figure 3 (a) 및 Figure 3 (b)는 제안한 컨버터의 두 구성성 분을 나타내고 있다. Figure 3 (a)는 기존의 역률보상 부스 트 컨버터의 스위치가 제안된 컨버터에서는 직렬 연결된 두 개의 스위치(S_1 , S_2)로 대체되었음을 알 수 있다. 또한 Figure 3 (b)는 이 두 스위치가 벅 컨버터도 제어한다는 것 을 보여준다.

2.2 작동원리

제안된 컨버터의 작동원리를 살펴볼 때 스위칭 사이클과 전력흐름 사이클을 함께 고려해야한다. 두 스위치의 ON, OFF 상태 조합에 따라 스위칭 사이클은 Table 1 과 같이 네 구간으로 구분할 수 있다. 1은 ON을 0은 OFF를 각각 나타낸다.

Table 1: Switching cycle intervals for different combination switch states

Switch States	Interval	Mode	
S_1 S_2		<i>Boost PFC</i>	<i>Buck</i>
1 1	I	L_1 charging	L_2 discharging
1 0	II	L_1 discharging	L_2 charging
0 1	III	L_1 discharging	L_2 discharging
0 0	IV	L_1 discharging	L_2 discharging

2.2.1 Interval-I ($[0, d_1 T_s]$): S_1, S_2 ON, D_B OFF

Figure 4 (a)에서 알 수 있듯이 이 구간동안 부스트 단의 인덕터 L_1 은 충전되고 벅 단의 인덕터 L_2 는 방전되어 V_{L1} 은 양이 되고 V_{L2} 는 음이 된다. 이 시간 부스트 컨버터는 튜터 온, 벅 컨버터는 프리휠링 되는 구간과 유사하다.

두 인덕터 양단에 대한 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{L1} = |V_{in}| \quad (1)$$

$$V_{L2} = -V_{o2} \quad (2)$$

2.2.2 Interval-II ($[d_1 T_s, (d_1 + d_2) T_s]$): S_1, D_B ON, S_2 OFF

Figure 4 (b)에 나타낸 것과 같이 이 시간 동안에는 아래 쪽 스위치 S_2 가 OFF 된다. 부스트 단의 인덕터 전류(i_{L1})는 부스트 다이오드 전류(i_{DB})와 벅 인덕터 전류(i_{L2})로 나눠져 흐르는데 그 비율은 부하저항 R_{o1} 과 R_{o2} 의 비율에 따라 달라진다. 이 구간 두 인덕터 양단에 대한 전압방정식은 다음식과 같다.

$$V_{L1} = |V_{in}| - V_{o1} \quad (3)$$

$$V_{L2} = V_{o1} - V_{o2} \quad (4)$$

2.2.3 Interval-III ($[(d_1 + d_2) T_s, (d_1 + d_2 + d_3) T_s]$)

: S_1, S_2 OFF, D_B ON 또는 S_1, OFF, S_2, D_B ON

Figure 4 (c)와 같이 이 구간동안은 두 스위치 S_1 과 S_2 가 모두 OFF 된다.

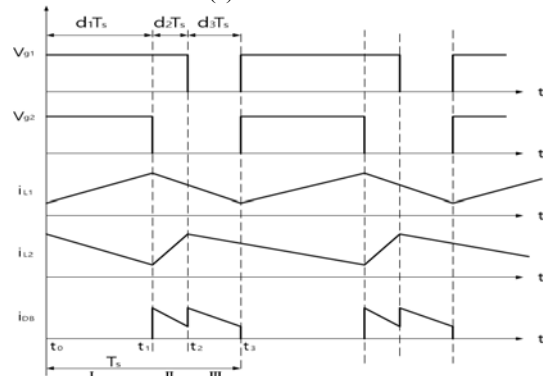
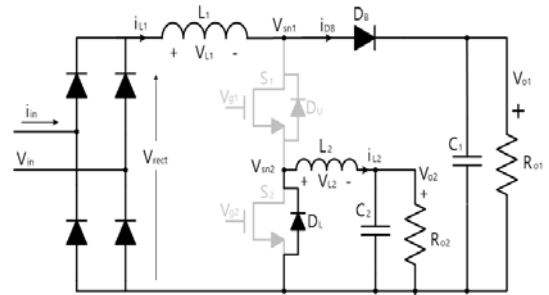
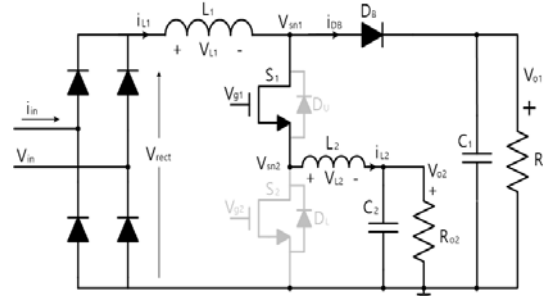
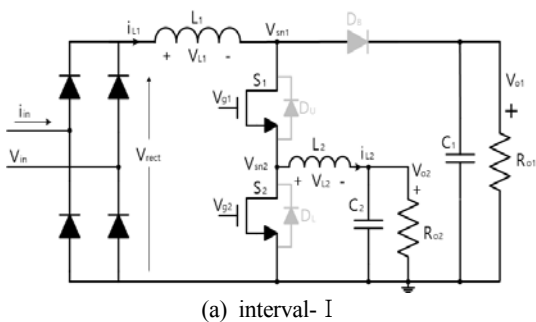
인덕터 전류 i_{L1} 과 i_{L2} 가 각각 다이오드 D_B 와 D_L 로 흐르게 된다.

이 시간동안 인덕터 양단에 대한 전압방정식은 다음식과 같다.

$$V_{L1} = |V_{in}| - V_{o1} \quad (5)$$

$$V_{L2} = -V_{o2} \quad (6)$$

각 구간에 대한 인덕터 전류 i_{L1} 및 i_{L2} 와 다이오드 전류 i_{DB} 를 게이트 신호와 함께 Figure 4 (d)에 나타내었다.



(d) Inductor current(i_{L1}, i_{L2}) and diode current(i_{DB}) along with the gate signal(V_{g1}, V_{g2})

Figure 4: Switching cycle operating modes of the proposed converter

정상상태에서는, 입력 교류전압의 1/2사이클에 대한 VSB(Voltage Second Balance)원리를 적용하면 [volt-sec]의 합이 영이 되어야하므로 위의 식들을 대입함으로써 다음과 같은 입-출력 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{o1} = \frac{|V_{in}|}{(1 - d_1)} \quad (7)$$

$$V_{o2} = d_2 V_{o1} \quad (8)$$

위식을 통해 S_1 과 S_2 가 모두 ON 되는 구간인 $d_1 T_s$ 에 의해 부스트 출력전압이, S_1 이 ON 되고 S_2 가 OFF 되는 $d_2 T_s$ 에 의해 벅 출력전압이 결정된다는 것을 알 수 있다.

2.3 제어방식

본 논문에서 제안한 컨버터의 유효성을 평가하기 위해서

는, 다음 항목들에 대하여 그 성능을 확인할 필요가 있다.

- a) 부스트 컨버터 측 전압제어 성능(V_{o1})
- b) 벅 컨버터 측 전압제어 성능(V_{o2})
- c) 입력전류의 역률(PF)

먼저, 부스트 컨버터 측의 출력전압을 제어하기 위해서 두 스위치가 동시에 ON 되는 구간의 듀티비 d_1 을 선정해야한다. 그 후 벅 컨버터 측에 원하는 출력전압을 얻기 위해 스위치 S_1 은 ON, 스위치 S_2 는 OFF 되는 구간의 듀티비 d_2 를 계산한다. 다음 3개의 피드백 컨트롤 루프를 가지는 제어방식에 의해 원하는 이중 DC출력을 얻을 수 있다.

2.3.1 전류제어

입력전류의 파형을 일정 형상으로 정형하는 것은 일종의 추적알고리즘에 의해 실현될 수 있다. 입력전류의 형상을 전원전압과 일치시키기 위해서는 Figure 5에서 인덕터 L_1 의 전류 i_{L1} 을 정류전압과 동일하게 제어해야한다.

$$(i_{L1} = k_{in} V_{rect}, V_{rect} = |V_{in}|)$$

전류의 파형을 교류전압과 동일한 정현파와 형상으로 제어하기 위해서는 높은 속도를 가진 제어기가 필수적이다. 검출된 인덕터 전류(k_{iL1})가 기준전류(i_{ref})와 일치하도록 제어한다.

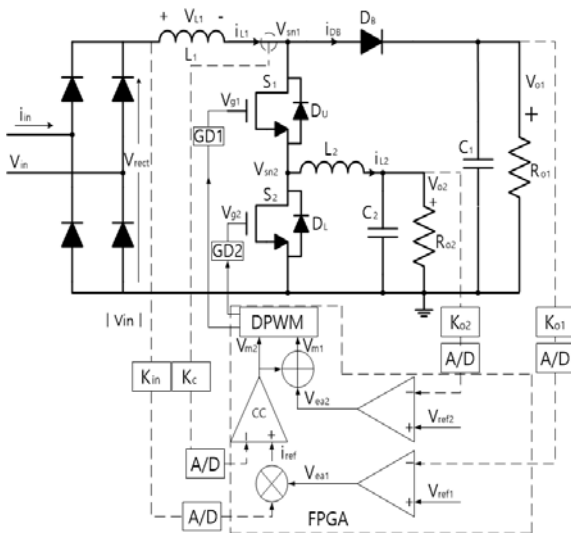


Figure 5: Closed loop control scheme of dual output PFC converter

2.3.2 부스트 전압제어

부스트 PFC 컨버터의 출력전압(V_{o1})은 전압제어기에 의해 수행되는데 기준 전압이 직류 값이므로 속도가 그다지 높을 필요는 없다. Figure 5에서 알 수 있듯이, 이 제어기의 출력(V_{ea1})이 전류제어기 기준전류의 피크 값을 결정한다.

2.3.3 벅 전압제어

식 (8)에 의하면 벅 컨버터 측의 전압(V_{o2})은 부스트 컨버터 측 전압(V_{o1})과 듀티비 d_2 에 의해 결정된다. 벅 컨버터 단의 전압을 유지하기 위한 전류의 근원은 부스트 컨버터의 인덕터 전류(i_{L1})이다. 또한 벅 컨버터 쪽으로 전달되는 전력은 스위치 S_1 에 의해 제어된다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 직류 이중출력 PFC 컨버터의 특성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 소프트웨어는 Powersim사의 PSIM을 사용하였다.

3.1 시뮬레이션 개요

Figure 6은 직류 이중출력 PFC 컨버터의 PSIM 프로그램 계통도를 나타낸다.

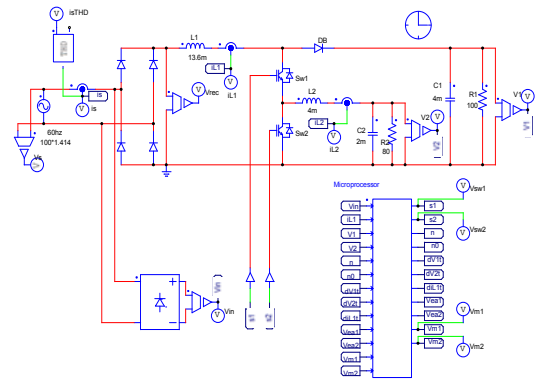


Figure 6: The PSIM schematic diagram of the PFC converter for Dual DC output

시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터는 Table 2와 같다.

Table 2: Parameters of the PFC converter for Dual DC output

Parameters/Components	Specifications
Boost inductor, L_1	13.6 mH
Buck inductor, L_2	4 mH
Boost capacitor, C_{o1}	4 mF
Buck capacitor, C_{o2}	2 mF
Loads, R_1	100 Ω
Loads, R_2	80 Ω
Switching Frequency	50 kHz

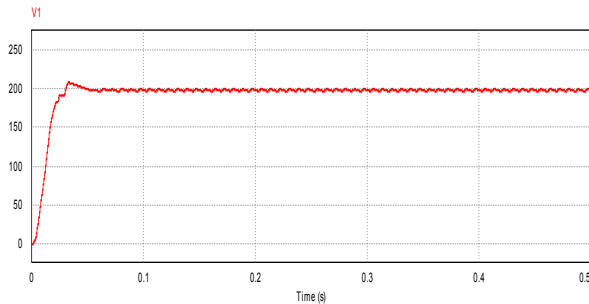
3.2 시뮬레이션 결과

Figure 7 (a), Figure 7 (b)는 스텝 전압설정 값 변화(고압 0→200[V], 저압 0→24[V])에 따른 부스트 컨버터 및 벅 컨

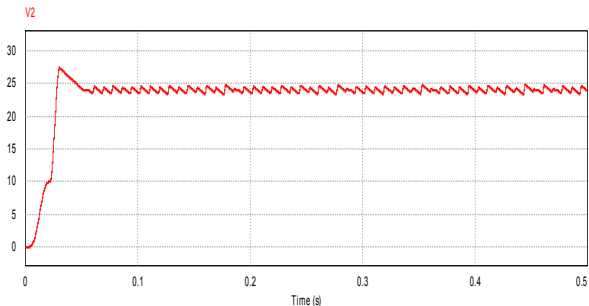
버터 출력전압을 나타낸다. 초기 전압상승 및 과대전류를 완화시키기 위하여 적절한 Starting Algorithm을 적용하였다. 비교적 짧은 시간에 지령전압이 출력됨을 확인할 수 있다.

Figure 7 (c), Figure 7 (d)는 정상상태(0.4~0.5초)의 전원전압 및 입력전류를 도시하고 있다. 기존의 브릿지 다이오드 정류 시 역률이 32[%], THD가 290[%]정도였지만, PFC (Power Factor Compensation; 역률보상)제어 시에는 부하에 따라 역률이 87~90[%], THD가 48~50[%]를 나타내었다.

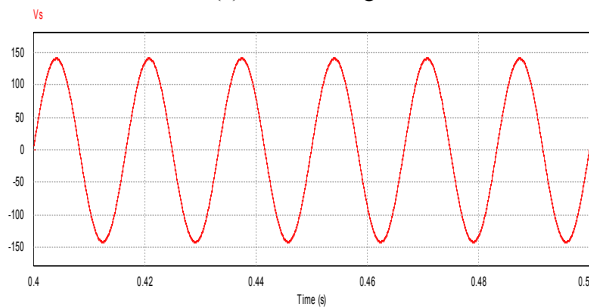
Figure 7 (e), Figure 7 (f)는 각각 정상상태의 IGBT 게이트 신호를 나타내고 있고, Figure 7 (g) 및 Figure 7 (h)는 그 순간 인덕터 전류 i_{L1} , i_{L2} 를 보여준다.



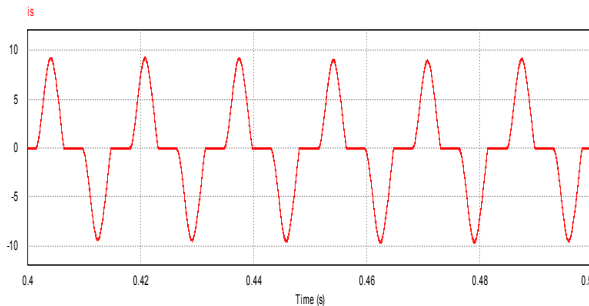
(a) Boost Voltage



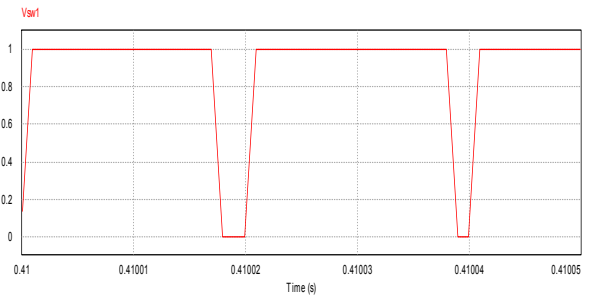
(b) Buck Voltage



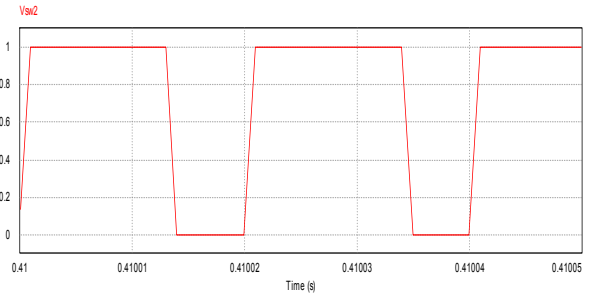
(c) AC Source Voltage



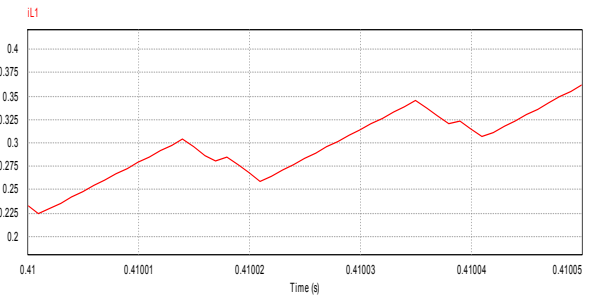
(d) AC Input Current



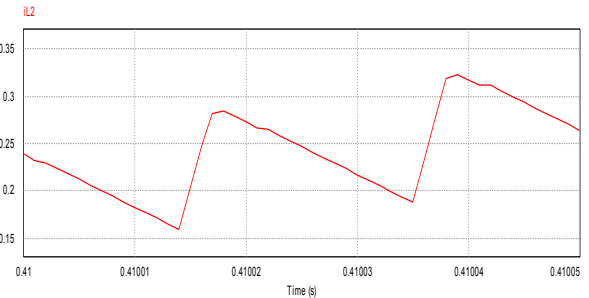
(e) Gate signal of IGBT 1



(f) Gate signal of IGBT 2



(g) Current of Inductor 1

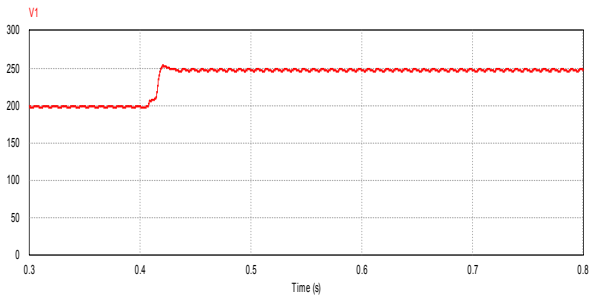


(h) Current of Inductor 2

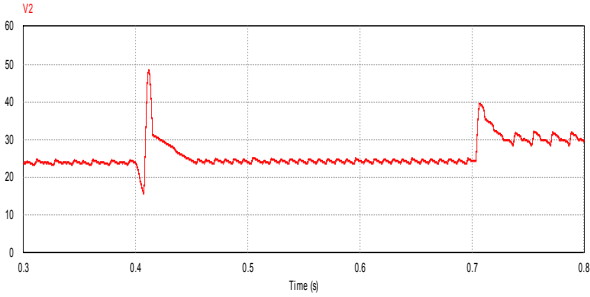
Figure 7: Simulation results of the proposed dual output converter in step-up mode

Figure 8은 부스트 전압 200[V] 출력 중, 0.4초에 전압지령 값을 250[V]로 변화시켰을 경우의 응답특성과 벅 전압 24[V] 출력 중, 0.7초에 전압지령 값을 30[V]로 변화시켰을 경우의 응답특성을 나타내고 있다. 전압이 지령 값을 잘 추종하고 있으며 입력전류의 속도성도 양호함을 알 수 있다.

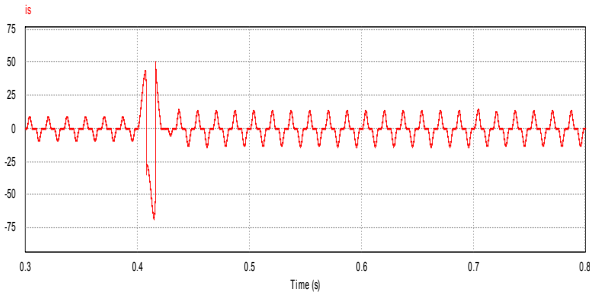
Figure 9는 부스트 전압 200[V] 출력 중 0.4초에 전압지령 값을 180[V]로 감소시키고, 벅 전압 24[V] 출력 중 0.7초에 전압지령 값을 20[V]로 감소시킬 경우의 응답특성을 나타내고 있다. 전압이 새로운 지령 값을 잘 추종하고 있으며 입력전류도 신속히 제어되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Boost Voltage

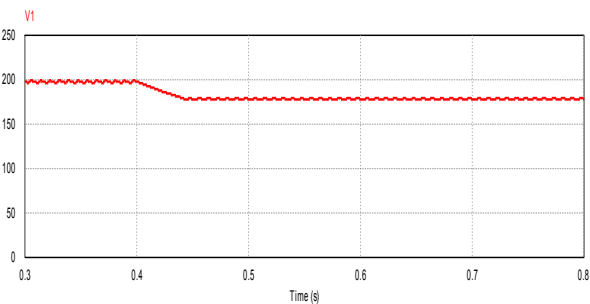


(b) Buck Voltage

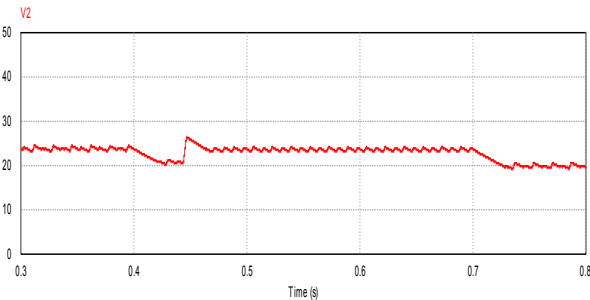


(c) AC Input Current

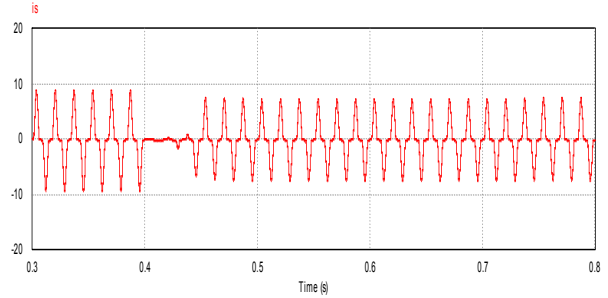
Figure 8: Simulation results of the proposed dual output converter for increasing of voltage command during operation



(a) Boost Voltage



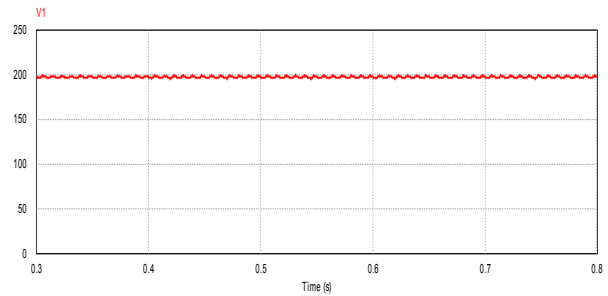
(b) Buck Voltage



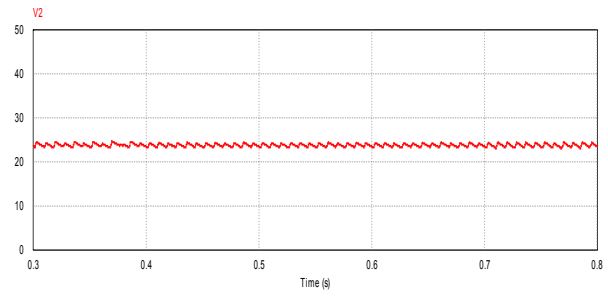
(c) AC Input Current

Figure 9: Simulation results of the proposed dual output converter for decreasing of voltage command during operation

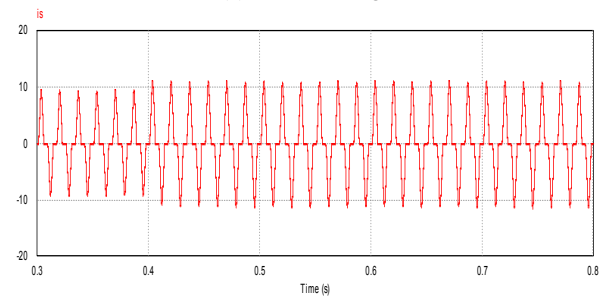
Figure 10은 부스트 전압 200[V] 출력 중 0.4초에 고압 측의 부하저항을 100[Ω]에서 80[Ω]으로 감소시키고, 벡 전압 24[V] 출력 중 0.7초에 저압 측의 부하저항을 80[Ω]에서 64[Ω]으로 감소시킴으로써 각 컨버터의 출력을 증가시킨 경우의 응답특성을 나타내고 있다. 출력전압의 변화가 거의 없으며 입력전류의 크기도 빠르게 상승함을 볼 수 있다.



(a) Boost Voltage



(b) Buck Voltage



(c) AC Input Current

Figure 10: Simulation results of the proposed dual output converter for increasing of load command during operation

Figure 11은 부스트 전압 200[V] 출력 중 0.4초에 고압 측의 부하저항을 100[Ω]에서 120[Ω]으로 증가시키고, 벡 전압 24[V] 출력 중 0.7초에 저압 측의 부하저항을 80[Ω]에서 96[Ω]으로 증가시킴으로써 각 컨버터의 출력을 감소시킨 경우의 응답특성을 나타내고 있다. 과도상태에서 출력전압의 변동이 거의 없을 정도로 제어되고 있으며, 입력전류도 신속하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

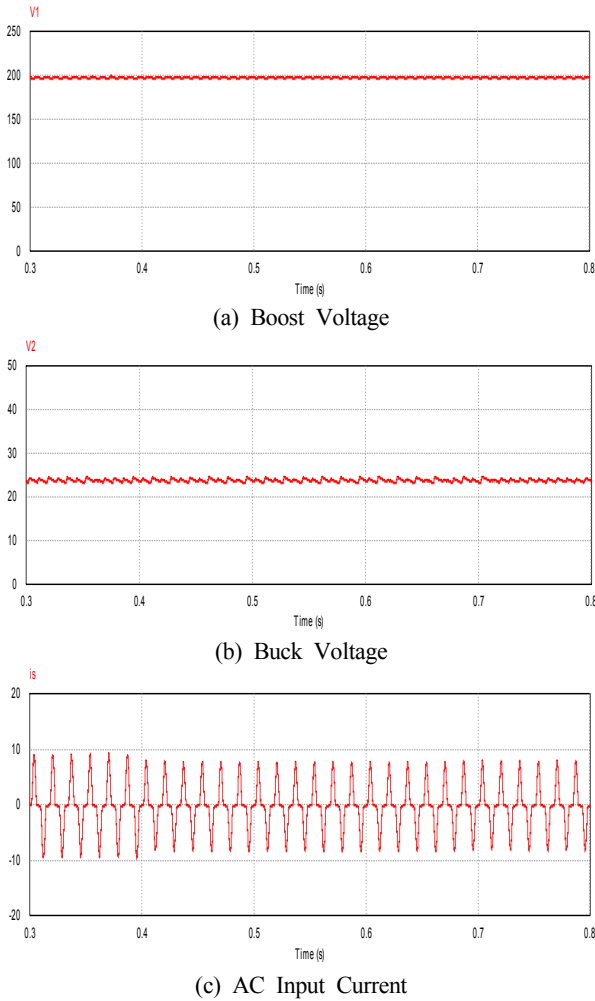


Figure 11: Simulation results of the proposed dual output converter for decreasing of load command during operation

4. 결론

본 논문은 DC 배전시스템을 위해 유용하게 활용될 수 있는 고압 및 저압의 이중출력 AC-DC PFC(역률보상) 컨버터를 제안하였다. 컨버터의 토폴로지와 동작원리를 자세히 기술하였고, 스위칭 소자의 상태에 따라 각 구간에서 발생하는 현상을 회로이론을 통해 분석함으로써 제안한 컨버터가 AC 입력보다 높은 DC 전압 및 낮은 DC 전압을 동시에 출력할 수 있음을 입증하였다. 또한 Powersim사의 PSIM 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 제안한 컨버터의 이론 및 해석의 유효성을 확인하였으며, 아래와

같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제안한 컨버터는 비교적 간단한 제어방식에 의해 AC 입력전압보다 높은 DC 전압 및 낮은 DC 전압을 동시에 얻을 수 있었다.
- 2) 운전 중 출력전압의 증가 및 감소가 요구될 경우, 짧은 시간 내에 원하는 출력전압을 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 3) 운전 중 부하가 증가하거나 감소하여도 지속적이고 안정된 DC 전압의 출력이 가능함을 알 수 있었다.
- 4) AC 입력전압의 파형과 동일하게 인덕터 전류를 제어함으로써 입력전류의 역률을 상승시켜 전력의 품질이 향상될 수 있었다.

Author Contributions

Conceptualization, Y. J. Kim and J. J. Hur; Methodology, J. S. Kim; Software, Y. J. Kim; Validation, Y. J. Kim and J. S. Kim; Formal Analysis, B. D. Jeong; Investigation, D. U. Sin; Writing–Original Draft Preparation, Y. J. Kim; Writing–Review & Editing, J. J. Hur;

References

- [1] S. Backhaus, DC Micro-grids Scoping Study-Estimate of Technical and Economic Benefits, U S Department of Energy, 2015.
- [2] K. Garbesi, V. Vossos, and H. Shen, Catalog of DC Appliances and Power Systems, Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2010.
- [3] R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] M. B. F. Prieto, S. P. Litran, E. D. Aranda, and J. M. E. Gomez, “New single-input, multiple-output converter topology: Combining single-switch nonisolated dc-dc converter for single-input, multiple-output applications,” IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 10, no. 2, pp. 6-20, 2016.
- [5] D. Chen, “Present states and development of the single-stage uninterruptible ac-dc converters,” Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1915-1918, 2009.
- [6] Y. Tang, D. Zhu, C. Jin, P. Wang, and F. Blaabjerg, “A three-level quasi-two-stage single-phase PFC converter with flexible output voltage and improved conversion efficiency,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 717-726, 2015.