

출력커패시터 내압 저감이 가능한 승압 컨버터 구조

Circuit configuration of step-up converter with reduced working voltage of output capacitor

김 선 필*, 박 성 준*, 강 필 순**★

Sun-pil Kim*, Sung-Jun Park*, Feel-soon Kang**★

Abstract

To supply a high voltage to an inverter, a motor control unit (MCU) generally employs a front-end boost converter. Because it generates a high output voltage, the converter needs an output capacitor, which has a high working voltage resulted in cost increasing. To solve this problem, we present a bidirectional dc-to-dc converter, which can decrease a working voltage of the output capacitor. Basic characteristic of the proposed converter is similar to a conventional boost converter. A difference comes from the structure of the output terminal connecting an output capacitor and an input battery in series. Owing to this circuit configuration, the working voltage of the output capacitor becomes lower than that of a conventional boost converter. After theoretical analysis, we carry out simulations and experiments to verify the validity and performance comparing with a conventional boost converter.

요 약

모터제어장치(MCU)는 높은 전압을 공급하기 위해 인버터 앞 단에 승압용 컨버터를 사용한다. 승압 컨버터는 높은 출력 전압을 생성하기 때문에 내압이 높은 출력 커패시터가 필요하여 커패시터의 비용이 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해 출력 커패시터의 작동 전압을 낮출 수 있는 승압 컨버터 구조를 제시한다. 제안된 컨버터의 기본 특성은 기존의 부스트 컨버터와 유사하며, 출력 커패시터와 입력 배터리를 직렬로 연결하는 출력 단자의 구조적 차이가 있다. 이러한 출력단 회로 구조에 의해 출력 커패시터의 동작 전압은 기존 승압 컨버터 보다 낮아진다. 이론적 분석, 시뮬레이션, 실험을 통해 기존 부스트 컨버터와 비교하고 타당성과 성능을 검증한다.

Key words : boost converter, electric vehicle (EV), efficiency, motor control unit (MCU), working voltage

* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

** Dept. of Electronics and Control Engineering, Hanbat National University

★ Corresponding author

E-mail : feelsoon@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1172

※ Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2017R1A2B4012154)

Manuscript received Aug. 28, 2018; revised Sept. 11, 2018; Accepted Sept. 18, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 전기자동차 MCU 관련 개발 트렌드는 낮은 배터리 전압과 높은 모터 구동 전압이다. 배터리로부터 공급되는 입력전압을 낮게 선정함으로써 배터리 셀의 적층 수를 작게 구성할 수 있어 전기적 안정성과 구조적 신뢰성을 확보할 수 있으며, 추진용 모터의 전압 사양을 높게 설계함으로써 동손에 의한 손실을 최소화하고 권선의 사용 및 방열 구조를 최적화하기에 유리하다. 따라서 배터리의 낮은 전압으로부터 높은 모터 구동 전압을 공급하기 위한 고승압형 dc-to-dc 컨버터에 대한 연구가 진행되고 있으며 일본 도요타 자동차 등에 의한 적용 사례가 소개되고 있다[1]~[7].

승압형 dc-to-dc 컨버터는 고주파 변압기의 사용 유무에 따라 절연형 컨버터와 비절연형 컨버터로 나누어진다. 절연형 컨버터의 경우 고주파 변압기를 사용함으로써 턴수 비의 조절을 통하여 높은 전압을 얻을 수 있지만 누설 인덕턴스로 인한 스위치의 전압 서지와 스너버 회로의 손실 등의 문제로 인하여 효율이 감소하고 부피 및 가격이 상승한다는 단점을 가지고 있다[8]~[11]. 또한 차량 탑재형의 경우, 시스템의 무게는 연비와 직접적으로 관련되며 권선을 갖는 자성체의 특성상 진동에 의한 구조적 신뢰성 확보가 어려운 단점이 있어 비절연형 타입의 승압형 컨버터 적용이 유리하다. 대표적인 승압형 컨버터인 부스트 컨버터는 회로의 기생 성분을 고려하지 않았을 경우 입·출력 전압의 비는 $1/(1-D)$ 로 표현되며 스위치 도통비 D 가 커질수록 전압 승압비가 상승하게 된다. 이 경우 부스트 컨버터의 일정 출력전압 유지를 담당하는 출력 커패시터 양단에 인가되는 전압이 상승하게 되므로 높은 동작전압 (Working Voltage)을 갖는 커패시터가 요구되어 단가 상승을 초래하게 된다.

따라서 본 논문에서는 출력 커패시터의 내압 저감이 가능한 승압형 dc-to-dc 컨버터 구조를 제안한다. 제안된 승압형 컨버터 동작에 대한 이론적 분석을 수행하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 입증한다. 또한, 기존 부스트 컨버터와 비교·분석함으로써 전기차 MCU용 승압형 컨버터로서의 타당성을 검증한다.

II. 출력 커패시터 내압 저감용 컨버터

그림 1은 제안하는 dc-to-dc 컨버터를 결합시킨

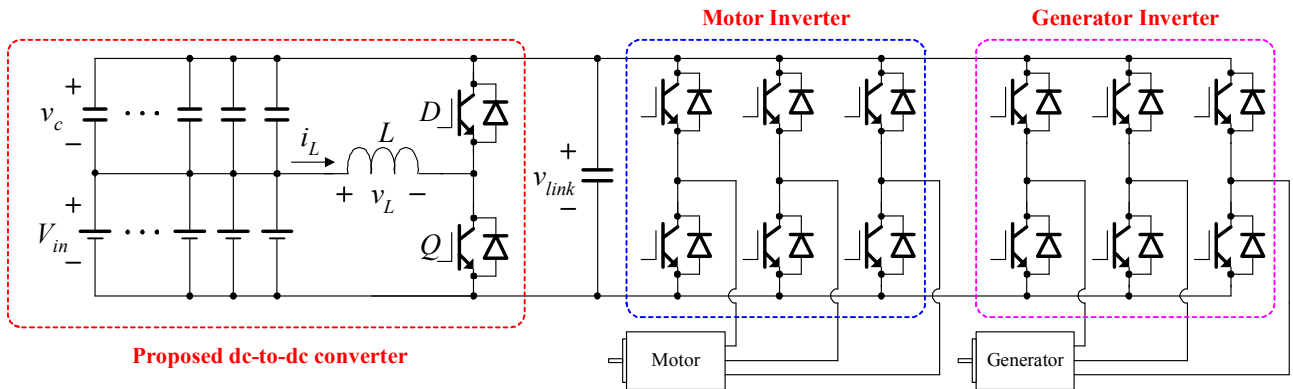


Fig. 1. Circuit configuration of a motor control unit with the proposed dc-to-dc converter.

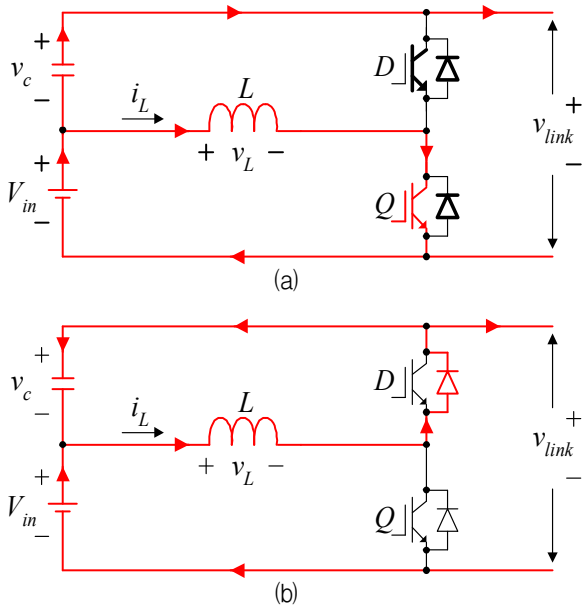
그림 1. 제안하는 dc-to-dc 컨버터를 갖는 모터제어장치의 회로 구조

전기차 MCU의 회로 구조를 보여준다. MCU는 추진용 모터 구동을 위한 Motor inverter, 발전기 구동용 Generator inverter와 배터리 입력단, 그리고 제안하는 컨버터가 위치하고 있는 dc-to-dc 전력 변환단으로 구성된다. 제안하는 컨버터는 두 개의 스위치(Q, D), 인덕터(L), 출력 커패시터(C)와 직렬 결합된 배터리 입력 전압원으로 구성된다. 회로 구조적으로 제안된 컨버터의 출력 전압은 입력전압과 출력 커패시터의 전압의 합으로 이루어지기 때문에 출력 커패시터의 내압을 감소시킬 수 있다.

$$v_{link} = V_{in} + v_C \tag{1}$$

전기차 MCU에서 dc-to-dc 컨버터는 추진용 모터 구동을 위한 승압 동작과 회생전력을 배터리로 충전시킬 수 있는 강압 동작을 동시에 수행한다. 승압 동작은 스위치 Q 와 스위치 D 의 바디 다이오드를 이용하며, 배터리 충전을 위한 강압 동작에서는 스위치 D 와 스위치 Q 의 바디 다이오드를 이용하여 전형적인 강압형 벡(Buck) 컨버터와 동일한 동작을 수행하게 된다. 본 논문에서는 제안하는 컨버터가 승압 동작을 할 경우에 한정하여 제안하는 회로 구조가 출력 커패시터의 내압 저감 효과가 있음을 증명한다.

제안하는 컨버터의 승압모드는 스위치 Q 의 on/off 상태에 따라 두 개의 모드로 구분된다. 회로 해석은 인덕터 전류가 연속모드, 정상 상태 동작, 기생 성분을 무시한 이상적인 상태라고 가정한다. 각 동작 모드시 회로 상태는 그림 2, 주요 동작파형은 그림 3에 나타낸다.



(a) mode 1, Q=ON, (b) mode 2, Q=OFF.

Fig. 2. Operational modes for a step-up operation.

(a) 모드 1, Q=ON, (b) 모드 2, Q=OFF

그림 2. 승압 동작 모드

모드 1 ($0 < t \leq D$): 그림 2(a)에서 스위치 Q 가 턴-온 되면 입력 배터리 전압 (V_{in})이 인덕터 양단에 인가되어 인덕터 전류 (i_L)가 증가하기 시작한다. 출력 전압 (v_{link})은 입력 배터리 전압 (V_{in})과 출력 커패시터 전압 (v_c)의 합으로 나타난다. 모드 1에서 인덕터 전류는 식(2)와 같이 입력 전류와 동일하며 인덕터 양단 전압은 식(3)과 같다.

$$i_L = i_{in} = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_L(0) = \frac{V_{in}}{L} t + i_L(0) \quad (2)$$

$$v_L = V_{in} = v_{link} - v_c = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

여기서 $i_L(0)$ 은 $t=0$ 에서 인덕터 전류의 초기값이다. $i_L(0)$ 이 0 [A]이면, 스위치 Q 의 도통비가 D 일 때 인덕터 전류의 변화량은 식(4)와 같다.

$$\Delta i_{L(ON)} = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (4)$$

모드 2 ($D < t \leq DT$): 스위치 Q 가 턴-오프 되면 인덕터는 출력 커패시터로 저장된 에너지를 방출한다. 인덕터 충전 에너지는 출력 커패시터의 충전과 동시에 부하에 에너지를 공급하게 되며, 인덕터 양단 전압은 식(5)와 같다.

$$v_L = V_{in} - v_{link} = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (5)$$

인덕터 전류 (i_L)는 스위치 D 의 바디 다이오드 전류 (i_D)와 같으며 식(6)으로 정의된다.

$$\begin{aligned} i_L = i_D &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t v_L dt + i_L(DT) \\ &= \frac{V_{in} - V_{link}}{L} (t - DT) + i_L(DT) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)으로부터 인덕터 전류의 변화량을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{L(OFF)} &= i_L(DT) - i_L(T) \\ &= \frac{(V_{link} - V_{in})(1 - D)T}{L} \end{aligned} \quad (7)$$

제안된 컨버터의 인덕터에 volt·sec 평형조건을 적용하면 입·출력전압과 도통비와의 관계식은 식(8)과 같다.

$$V_{in} DT = (v_{link} - V_{in})(1 - D)T \quad (8)$$

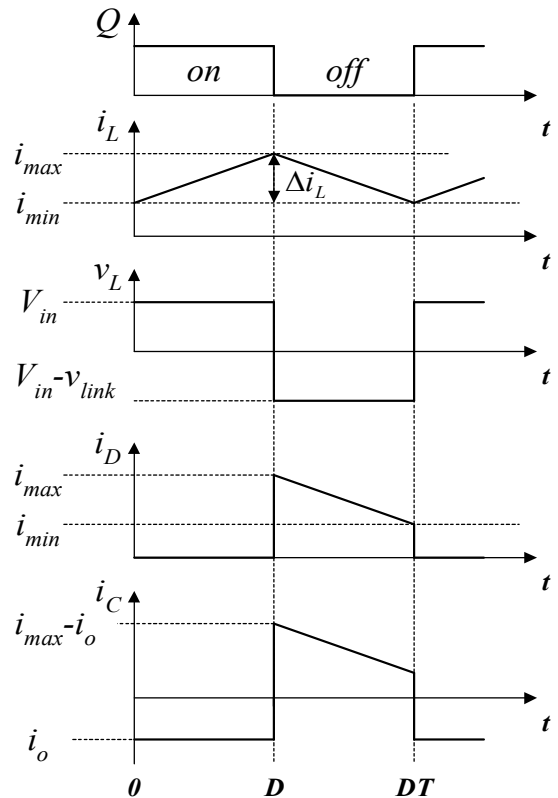


Fig. 3. Key waveform.

그림 3. 주요 동작파형

식(8)로부터 제안된 컨버터의 입·출력전압 전달 함수를 구하면 식(9)와 같다.

$$M_V(D) = \frac{v_{link}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (9)$$

식(9)로부터 제안된 컨버터가 기존의 부스트 컨버터와 동일한 입·출력 전압 전달함수를 가짐을 알 수 있다. 제안된 컨버터의 출력전압은 회로 구조상 항상 입력전압과 출력 커패시터의 합으로 이루어지게 됨으로 입력전압에 대한 출력전압의 승압비는 출력 커패시터의 전압에 의존하게 된다. 따라서 출력 커패시터에 대한 입력전압 전달 함수를 구하면 식(10)과 같다.

$$M_{V_c}(D) = \frac{v_c}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (10)$$

식(10)에서 입력전압에 대한 출력 커패시터 전압의 관계가 벡-부스트 컨버터와 동일함을 알 수 있다.

회로 구조적으로 제안하는 컨버터의 출력 커패시터 양단에 걸리는 전압의 크기는 기존 부스트 컨버터에 비해 낮다는 장점을 가진다. 두 컨버터의 출력전압이 v_{link} 라 할 때, 기존 부스트 컨버터의 출력전압은 식(11)과 같이 출력 커패시터 양단 전압과 동일하고, 제안하는 컨버터에서는 입력전압의 크기만큼을 뺀 나머지 전압이 출력 커패시터 전압으로 나타난다. 그러므로 입력 배터리 전압 크기의 증가에 비례하여 커패시터 내압은 줄어드는 장점이 있다.

$$v_c = v_{link} \quad (11)$$

$$v_c = v_{link} - V_{in} \quad (12)$$

III. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 PSpice 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 주요 파라미터 값은 표 1에 나타나며 비교를 위해 기존 부스트 컨버터도 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행한다.

Table 1. Simulation parameter.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
Input voltage, V_{in}	72 [V]
Output voltage, V_{link}	144 [V]
Output Power	415 [W]
Inductor, L	200 [μ H]
Output Capacitor, C	1000 [μ F]
Switching Frequency, f_s	20 [kHz]

그림 4는 스위치 도통비 50 [%]에서 제안된 컨버터의 주요 파형을 보여준다. 위에서부터 차례대로 스위치 Q의 제어신호, 인덕터 전류 (i_L), 인덕터 양단전압 (v_L), 스위치 D의 바디 다이오드 전류 (i_D), 출력 커패시터 전류 (i_C)와 양단전압 (v_C)를 나타낸다. 본 시뮬레이션 결과 파형은 그림 3에서 제시된 이론적 해석을 통해 구한 주요파형과 일치하며, 기존의 부스트 컨버터의 결과 파형[9]과 비교하여 출력 커패시터 양단에 인가되는 전압 크기를 제외한 모든 동작 파형이 동일함을 알 수 있다.

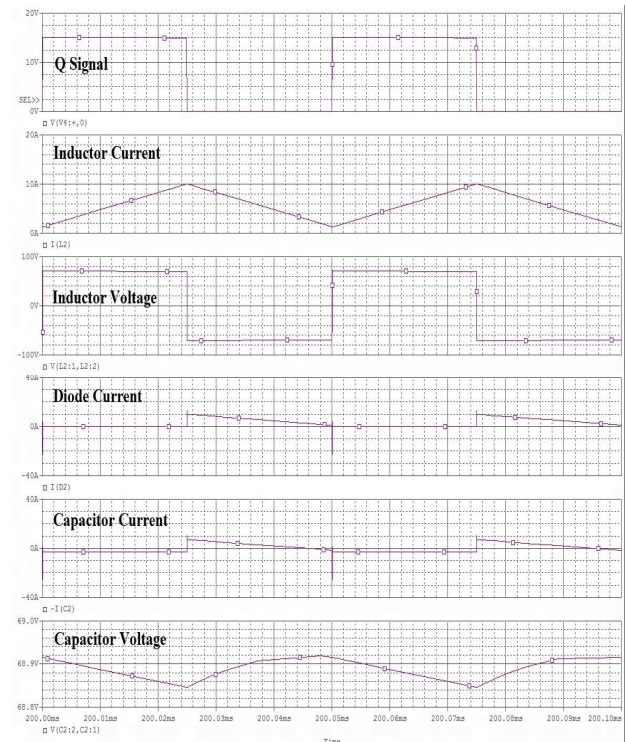


Fig. 4. Simulation results for switch Q control signal, inductor current (i_L), voltage across an inductor (v_L), body diode current of D (i_D), capacitor current (i_C), capacitor voltage (v_C) from the upper to the lower in sequence.

그림 4. 스위치 Q 제어신호에 대한 시뮬레이션 결과, 위에서부터 아래 순서로 인덕터 전류(i_L), 인덕터 양단전압(v_L), 바디 다이오드 전류(i_D), 커패시터 전류(i_C), 커패시터 전압(v_C)

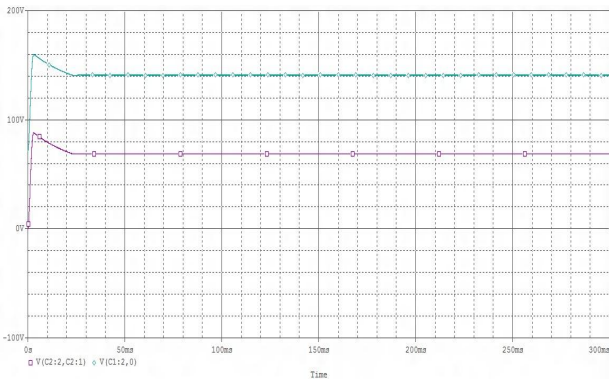


Fig. 5. Comparison of working voltage of output capacitor in a boost converter and the proposed converter.
그림 5. 부스트 컨버터와 제안된 컨버터의 출력 커패시터 동작 전압 비교

그림 5는 제안하는 컨버터와 기존 부스트 컨버터의 출력 커패시터 전압을 비교한 파형이다. 기존 컨버터의 출력 커패시터의 전압은 140.89 [V]이고 제안된 컨버터의 출력 커패시터의 전압은 68.89 [V]로 스위치의 도통비 50 [%]에서 제안된 컨버터의 출력 커패시터 전압이 절반으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 제안된 컨버터의 출력 커패시터 전압은 항상 입력 배터리 전압의 크기인 72 [V]를 뺀 만큼의 출력전압이 인가됨을 알 수 있다.

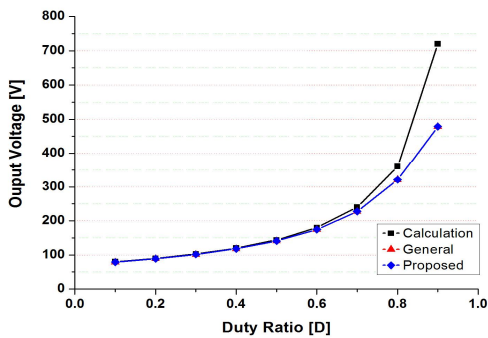


Fig. 6. Output voltage according to duty-ratio of switch Q.
그림 6. 스위치 Q 도통비에 따른 출력전압

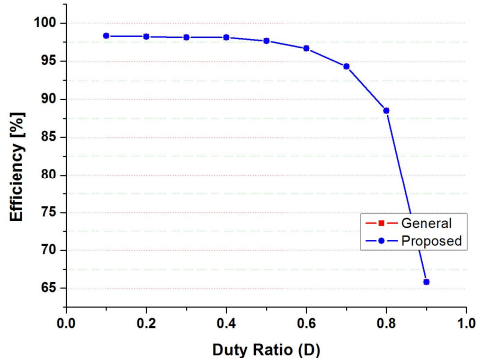


Fig. 6. Output voltage according to duty-ratio of switch Q.
그림 6. 스위치 Q 도통비에 따른 출력전압

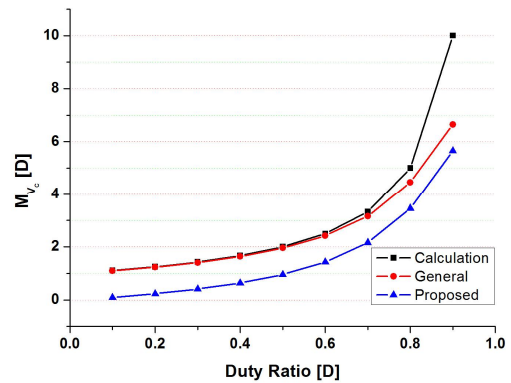
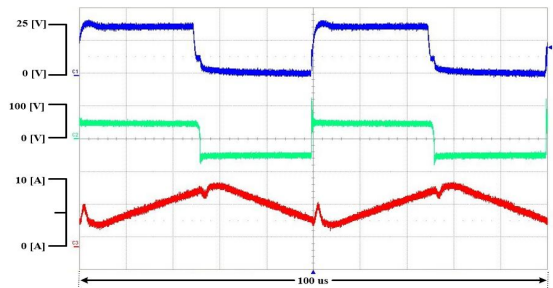
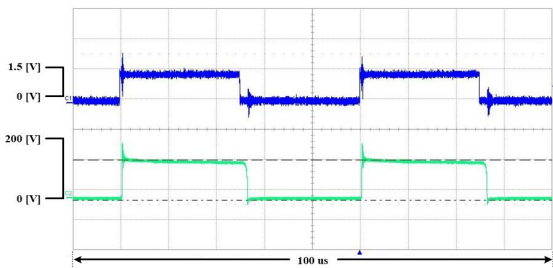


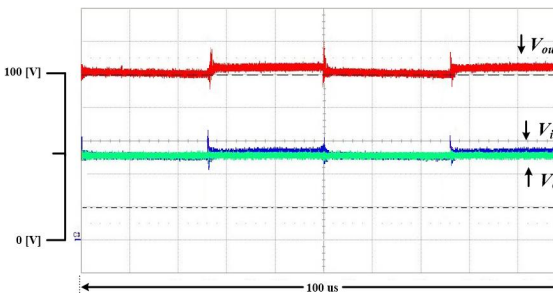
Fig. 8. Working voltage of an output capacitor according to duty-ratio of switch Q.
그림 8. 스위치 Q의 도통비에 따른 출력 커패시터의 동작전압



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Experimental results, (a) switch Q control signal, voltage across an inductor (v_L), and inductor current (i_L), (b) voltage across a body diode of D (v_D), (c) output voltage (V_{link}), input battery voltage (V_{in}), and output capacitor voltage (v_C).
그림 9. 실험결과, (a) 스위치 Q 제어신호, (b) 인덕터 양단전압(v_L), 인덕터 전류(i_L), (b) 바디다이오드 양단전압(v_D), (c) 출력전압(V_{link}), 입력배터리전압(V_{in}), 출력 커패시터전압(v_C)

그림 6은 스위치 도통비의 변화에 따라 식(9)에 의해 계산된 출력전압, 기존 부스트 컨버터와 제안된 컨버터의 출력전압에 대한 비교 그래프이다. 도통비의 증가에 따른 출력전압의 변화가 동일한 결과를 보여준다.

그림 7은 두 컨버터의 도통비에 따른 효율의 변화를 보여주는 시뮬레이션 결과 그래프로 동일한 특성에 따른 동일한 결과를 확인할 수 있다. 도통비가 60[%] 이상으로 증가하면 스위치 도통 손실, 인덕터의 ESL (Equivalent Series Inductance), 커패시터의 ESR (Equivalent Series Resistance) 등의 손실 성분이 증가하여 효율이 급감하는 문제가 발생한다. 실제 응용에 있어 기존의 부스트 컨버터와 같이 제안하는 컨버터의 도통비를 손실 등을 고려하여 80 [%]로 제한하는 경우 제안하는 컨버터는 이론적으로 최대 5배의 승압 효과를 얻을 수 있다.

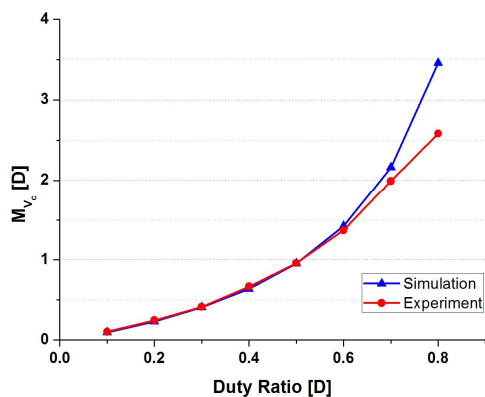


Fig. 10. Voltage amplitude modulation ratio (M_v).
그림 10. 전압 크기 변조비

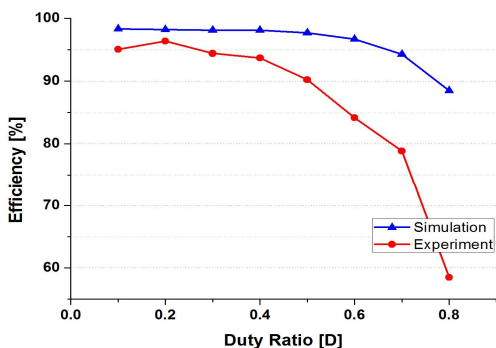


Fig. 11. Efficiency according to the increase of duty-ratio.
그림 11. 도통비 증가에 따른 효율

그림 8은 스위치 Q의 도통비 변화에 따른 입력 전압에 대한 출력전압의 승압비, 즉 출력 커패시터

양단 전압의 변화를 보여준다. 기존 부스트 컨버터는 출력전압과 출력 커패시터 전압이 동일하게 인가되므로 도통비의 증가와 비례해서 커패시터의 내압이 증가한다. 식(10)에 의해 제안하는 컨버터는 도통비 50 [%] 미만에서는 입력 배터리 전압보다 낮은 전압이 인가되고 50 [%] 이상에서는 입력 전압보다 큰 전압이 인가되지만, 항상 입력 배터리 전압 크기만큼을 뺀 전압이 커패시터 양단에 인가되므로 상대적으로 낮은 동작전압의 커패시터 사용이 가능하여 단가 절감에 유리하다.

제안하는 컨버터의 타당성 검증을 위해 시작품 기반의 실험을 수행하였다. 실험은 시뮬레이션 파라메타 조건과 동일하며 스위치는 Power MOSFET IRFP360, 출력 커패시터는 1000[μF]의 내압 400[WV]를 사용한다.

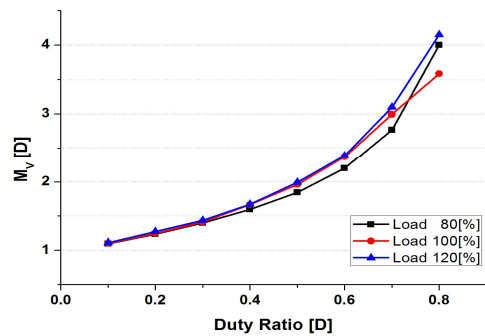


Fig. 12. Variation of amplitude modulation ratio between an input voltage and an output voltage at different load conditions.

그림 12. 부하 조건별 입력전압과 출력전압의 크기 변조비 변화

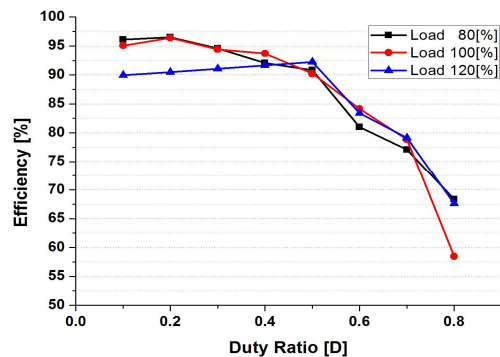


Fig. 13. Efficiency at different load conditions.

그림 13. 부하 조건별 효율 변화

그림 9(a)는 제안된 컨버터의 주요 실험 파형으로 스위치 Q의 on/off 동작에 대한 인덕터 양단 전

압(v_L)과 인덕터 전류(i_L), 그림 9(b)는 스위치 D 의 바디 다이오드의 양단 전압(v_D)이며 시뮬레이션과 동일한 동작 결과를 확인할 수 있다. 그림 9(c)는 출력 전압(v_{link}), 입력 배터리 전압(V_{in})과 출력 커패시터의 양단 전압(v_C)을 나타낸다. 출력전압이 입력 배터리 전압과 출력 커패시터 전압의 합으로 나타남을 확인할 수 있다.

그림 10은 입·출력전압에 대한 전압 전달비 (M_v)를 나타내며 도통비 50 [%]에서 1.96으로 시뮬레이션과 동일한 실험 결과를 얻었다. 도통비가 60 [%] 이상으로 증가할수록 실제 실험에 있어서는 손실 성분이 증가하여 시뮬레이션과의 차이가 발생한다.

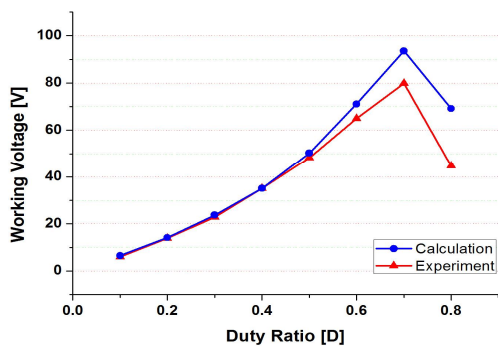


Fig. 14. Variation of voltage across an output capacitor according to duty-ratio of switch Q.

그림 14. 스위치 Q의 도통비에 따른 출력 커패시터 양단전압의 변화

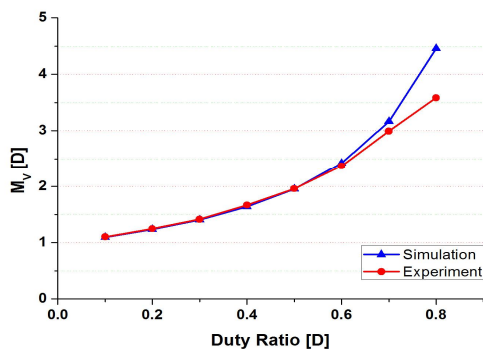


Fig. 15. Variation of amplitude modulation ratio between an input voltage and a capacitor voltage.

그림 15. 입력전압과 커패시터 전압의 크기 변조비 변화

그림 11은 스위치 Q 의 도통비와 효율의 관계를 보여준다. 실험 결과에 의하면 도통비 50 [%] 이하에서는 90 [%] 이상의 효율 특성을 보이지만, 도통비 50 [%] 이상에서는 인덕터 손실, 스위치 도통 손실 증가 등에 의해 급격한 효율 저하가 발생하게

된다.

그림 12는 도통비 변화에 따른 입·출력 전압 증폭비의 변화를 경부하 80 [%], 정격부하 100 [%], 과부하 120 [%] 조건에서 실험한 결과를 나타낸다. 세 가지 조건 모두 거의 유사한 전압 변조비를 보이지만, 그림 13의 효율 그래프에서 확인할 수 있듯이 50 [%] 이하의 도통비에서는 90 [%] 이상의 효율 특성을 나타내지만 60 [%]의 도통비로 동작하는 경우 10 [%]의 효율 감소가 나타난다.

그림 14는 도통비 증가에 따른 출력 커패시터 양단 전압의 변화를 보여주는 시뮬레이션과 실험 결과의 비교 그래프이다. 도통비 50 [%]까지는 거의 유사한 결과를 보이지만 50 [%] 이상으로 도통비가 증가하는 경우 실제 회로 상의 손실 성분이 급증하여 시뮬레이션과 실험 간의 차이가 발생하게 된다. 도통비 증가와 비례하여 커패시터 양단 전압은 상승하지만 도통비 70 [%] 이상에서는 하락하는 현상이 발생하는데 이는 실험에 사용된 배터리 설계 용량을 초과한 상태로 배터리 전압이 일시적으로 감소하므로 출력 커패시터 양단 전압 또한 비례적으로 감소하여 나타나게 된다.

그림 15는 도통비 증가에 따른 입력전압과 출력 커패시터 전압 크기 변조비의 변화를 나타낸다. 도통비 20 [%]에서 전압 증폭비는 0.25, 도통비 50 [%]에서 0.96, 도통비 80 [%]에서 2.58로 식(10)에서와 같이 입력전압과 출력 커패시터 전압간에는 벡-부스트 컨버터의 전압전달비와 동일 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 출력 커패시터의 내압 저감이 가능한 승압 컨버터 구조를 제안한다. 제안된 컨버터 동작에 대한 이론적 분석을 통해 제안하는 컨버터의 기본적인 동작 특성이 기존의 부스트 컨버터와 동일함을 증명하였고 입력 배터리와 출력 커패시터가 직렬로 결합되어 구성되는 출력단의 구조로 인해 입력 배터리 전압의 크기만큼 출력 커패시터의 내압 저감이 가능함을 확인하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 토대로 기존 부스트 컨버터와 비교·분석함으로써 전기차 MCU용 승압 컨버터로서의 타당성을 검증하였다.

References

- [1] N. Herath, P. Binduhewa, L. Samaranayake, J. Ekanayake, S. Longo, "Design of a dual energy storage power converter for a small electric vehicle," *IEEE Int. Conf. Ind. and Information Systems (ICIIS)*, 2017, pp.1-6.
DOI:10.1109/ICIINFS.2017.8300393
- [2] B. V. Kumar, R. K. Singh, and R. Mahanty, "A modified non-isolated bidirectional DC-DC converter for EV/HEV's traction drive systems," *IEEE Int. Conf. Power Elect. Drives and Energy Systems*, 2016, pp.1-6.
DOI:10.1109/PEDES.2016.7914345
- [3] A. M. Omara, M. Sleptsov, "Bidirectional interleaved DC/DC converter for electric vehicle application," *11th Int. Forum Strat. Tech. (IFOST)*, 2016, pp.100-104. DOI:10.1109/IFOST.2016.7884201
- [4] A. Kumar, P. Gaur, "Bidirectional DC/DC converter for hybrid electric vehicle," *Int. Conf. Advances in Computing, Comm. and Infor. (ICACCI)*, 2014, pp.839-843. DOI:10.1109/ICACCI.2014.6968295
- [5] A. K. Verma, B. Singh, and D.T. Shahani, "Grid to vehicle and vehicle to grid energy transfer using single-phase bidirectional AC-DC converter and bidirectional DC-DC converter," *Int. Conf. Energy, Automation and Signal*, 2011, pp.1-5. DOI:10.1109/ICEAS.2011.6147084
- [6] M. B. Dakshina and M. K. Kazimierczuk, "DC-DC converters for electric vehicle applications," *Elect. Insul. Conf. and Elec. Manufacturing Expo*, 2007, pp.286-293. DOI:10.1109/EEIC.2007.4562633
- [7] R. Gules, L. Pfitscher, and L. Franco, "An Interleaved Boost DC-DC Converter with Large Conversion Ratio," *Proc. of IEEE ISIE*, vol.1, 2003, pp.411-416. DOI:10.1109/ISIE.2003.1267284
- [8] M. S. Choi, S. G. Song, S. J. Park, D. K. Kim, and Y. G. Kim, "Development of High Efficiency Boost DC/DC Converter For EV," *Trans. Korean Inst. Power Elect.*, vol.15, no.2, pp.127-133, April 2010. DOI:10.6113/TKPE.2010.15.2.127
- [9] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, Third Edition,

pp. 224-228, Aug. 2003.

- [10] T. J. Liang and K. C. Tseng, "Analysis of integrated boost-flyback step-up converter," *Proc. of IEE Electric Power Appl*, vol.152, no.2, 2005, pp.217-225. DOI:10.1049/ip-epa:20045003
- [11] K. C. Tseng and T. J. Liang, "Novel high-efficiency step-up converter," *Proc. of IEE Electric Power Appl*, vol.151, no.2, 2004, pp.182-190. DOI:10.1049/ip-epa:20040022

BIOGRAPHY

Sun-Pil Kim (Member)



2011 : BS degree in Control and Instrumentation Engineering, Hanbat National University.
2013 : MS degree in Control and Instrumentation Engineering, Hanbat National University.

2013~Present : Doctoral course in Electrical Engineering, Chonnam National University.

Sung-Jun Park (Member)



1991 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
1993 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
1996 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2003~Present : Professor in Electrical Engineering, Chonnam National University.

Feel-soon Kang (Member)



2000 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
2003 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
2004~Present : Professor in Electronics and Control Engineering, Hanbat National University.