

자가발전 이동 카트 시스템을 위한 배터리 - 캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터

공성재¹, 양태철¹, 강경수¹, 노정욱[†]

Capacitor Bank Assisted Battery Fed Boost Converter for Self-electricity-generated Transportation Cart System

Sung-Jae Kong¹, Tae-Cheol Yang¹, Kyung-Soo Kang¹, and Chung-Wook Roh[†]

Abstract

A problem exists in the conventional transportation cart applications, in which an external power supply with mechanical contact connection (bus bar connection) is required to drive the motor. Therefore, continuous effort for maintenance is required, aside from the expensive bus bar connector. To solve this problem, a self-electricity-generated transportation cart system without bus bar has recently been introduced. In this system, a battery needs to store the power of the generated wheel, and a boost converter, which converts the low battery voltage to high bus voltage to drive the motor inverter, is necessary. However, since the instantaneous large current required for starting the motor is supplied from the battery, a battery with large size and volume should be adopted to withstand this large current. In this study, a boost converter that can supply a large instantaneous current by using super Capacitor string is proposed. The proposed converter can be realized with a small size and volume compared with the conventional battery-fed boost converter. Operational principles, analysis, and design of the proposed converter are presented, and experimental results are provided to validate the proposed converter.

Key words: Battery, Boost converter, Current limit, Super capacitor, Transportation cart system

1. 서 론

최근 온라인 마켓 및 모바일 쇼핑의 성장세에 따라 택배와 같은 운송업 또한 성장하는 추세이다. 특히 운송업은 빠르고 정확한 배송을 위해 물류센터에서 많은 물량의 물건을 적절하게 분류하는 것이 가장 중요하다. 이를 위해서는 카트의 모터 구동용 인버터에 안정적인 전원을 공급해야만 한다.

기존 물류센터의 카트는 그림 1과 같이 외부에 있는 전원공급 장치인 버스바와 카트의 컬렉터를 접촉시켜 카트에 장착된 모터 구동용 인버터에 전원을 공급한다.

이와 같은 방식은 장시간 사용 시 버스바와 컬렉터의 마모로 인해 안정적인 전원공급이 불가능하여 물류센터에서 물류를 제대로 분류하지 못하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 주기적으로 버스바와 컬렉터를 교체해줘야 한다. 하지만 이는 많은 비용과 시간이 소비되는 문제점을 가진다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같은 자가발전 이동 카트 시스템을 제안한다. 이 시스템은 카트의 바퀴에 내장된 발전기를 통해 배터리를 충전하고, 충전된 배터리는 제안하는 부스트 컨버터를 동작시킨다.

본 논문에서는 자가발전 이동 카트 시스템 중 모터 구동용 인버터에 전원을 공급하는 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터를 다룬다.

그림 3은 기존 부스트 컨버터를 적용하여 인버터에 전원을 공급하는 회로도이다. 기존의 부스트를 사용할 경우, 회로의 구성이 간단한 장점이 있다. 하지만 기존 부스트 컨버터의 경우 3배 이상의 승압이 어려우므로 적정수준의 입력 전압이 필요하다^[1]. 이는 많은 배터리

Paper number: TKPE-2018-23-1-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: drno@kookmin.ac.kr, Electronic Engineering, Kookmin University

Tel: +82-2-910-4947 Fax: +82-2-910-4449

¹ Electronic Engineering, Kookmin University

Manuscript received Oct. 11, 2017; revised Nov. 21, 2017; accepted Nov. 24, 2017

— 본 논문은 2017년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

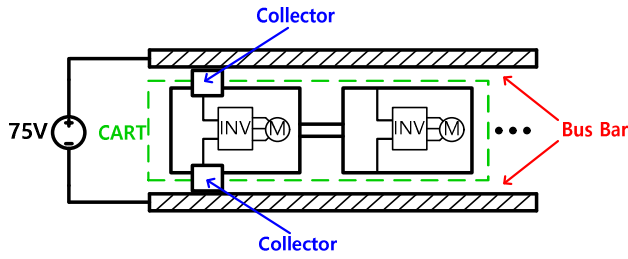


Fig. 1. Conventional transportation cart system block diagram.

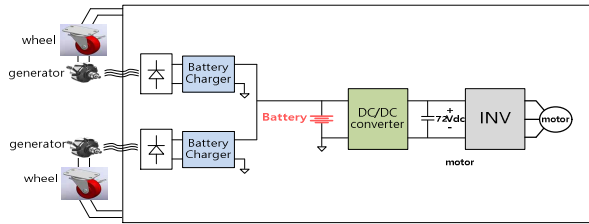


Fig. 2. Self-electricity-generated transportation cart system block diagram.

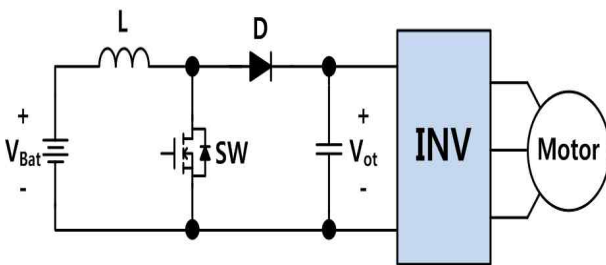


Fig. 3. Conventional boost converter.

의 직렬연결을 의미한다. 모터는 기동 시 순간적으로 큰 전류를 필요로 하므로 많은 병렬연결 개수가 필요하다. 이러한 배터리 개수의 증가는 회로의 부피 및 원가를 증가시키는 문제점이 있다. 또한, 인덕터의 크기가 커져 회로의 전체적인 부피가 증가하고, 스위치와 다이오드의 전류 스트레스가 높아 고가의 반도체 소자를 사용해야하는 문제점이 있다.

그림 4는 기존 부스트 컨버터에 출력 단에 Super Cap.을 추가한 회로도이다. 그림 3과 마찬가지로 많은 직렬연결 개수의 배터리가 필요하지만, 모터 기동 시 입력전류를 제한하고 부족한 전류는 Super Cap.이 보충하므로 배터리 병렬연결 개수는 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 이와 같은 방식은 인덕터의 크기와 스위치, 다이오드의 전류 스트레스를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 하지만 이는 Super Cap.이 높은 출력을 견뎌야하므로 많은 직렬연결 개수를 필요로 한다. 캐패시터는 직렬연결 개수가 증가하면 Capacitance가 감소하므로 Super Cap.이 제 역할을 못하는 문제점이 있다. Super Cap.의 Capacitance를 유지하기 위해서는 병렬연결 개수를 증가

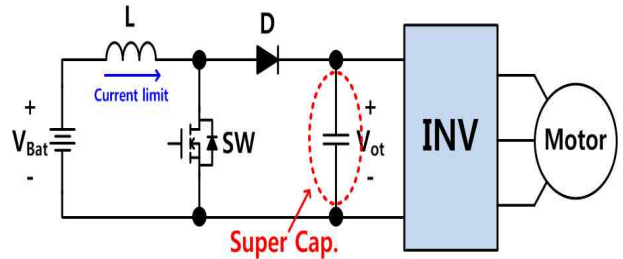


Fig. 4. Conventional boost converter + Super cap. string.

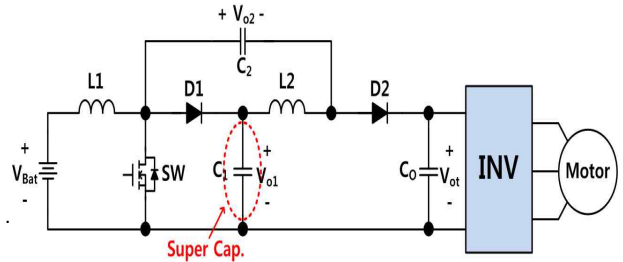


Fig. 5. Proposed capacitor bank assisted Battery fed boost converter.

시켜야한다. 그림 4는 배터리 개수 저감과 반도체 소자의 전류 스트레스를 줄일 수 있지만, 많은 Super Cap.을 필요로 하므로 결국 부피와 원가가 증가하는 문제점이 있다.

상기 단점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 5와 같은 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터를 제안한다. 제안 컨버터는 기존 부스트 컨버터 보다 높은 승압비를 가지므로 배터리의 직렬연결 개수를 줄일 수 있다. 그리고 그림 4의 방식과 같은 방식을 적용함으로써 배터리의 병렬연결 개수 또한 줄일 수 있다. 또한, Super Cap.이 출력 단이 아닌 중간에 위치하고 있어 Super Cap.이 부담하는 전압이 낮아져 직·병렬연결 개수를 최소화 할 수 있다. 따라서 원가 저감 및 부피 최소화가 가능하다.

본 논문에서는 자가발전 이동 카트 시스템을 위한 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터를 제안한다. 2장에서는 제안회로의 개념과 동작원리에 대해 설명한다. 다음 3장에서는 입출력 관계식 분석 및 기존 부스트 컨버터와 비교한다. 마지막으로 4장에서는 이론적 분석의 타당성과 제안회로의 효과를 실험결과로 증명한다.

2. 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터

제안 부스트 컨버터는 그림 5와 같이 한 개의 스위치 SW, 두 개의 인덕터 L1, L2, 두 개의 다이오드 D1, D2, 한 개의 Super Cap. C1, 두 개의 캐패시터 C2, CO로 구성되어 있다.

제안하는 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버

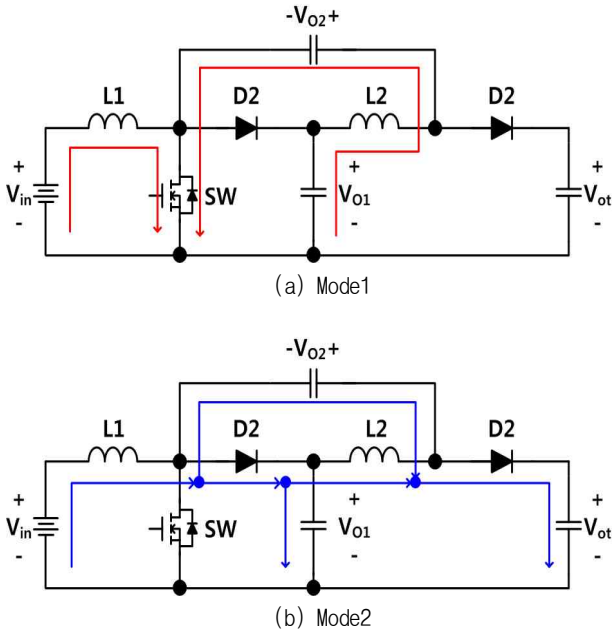


Fig. 6. Operating mode of proposed circuit.

터는 이동 카트가 짐을 내려놓기 위해 모터가 기동하는 짧은 시간 (0.2 ~ 1초) 동안 동작하고 그 외 시간동안에는 전류가 거의 흐르지 않는다.

Super Cap. String은 모터 기동 시 입력 전류가 제한 되면 순간 부족한 큰 전류를 배터리를 대신하여 보충한다^{[2]-[6]}. 그림 5와 같이 Super Cap.을 회로 중간에 위치하여 출력 단에 위치하였을 경우 보다 낮은 내압의 Super Cap. String 사용이 가능하다. 또한, 제안 컨버터는 기존 부스트 컨버터와 달리 3배 이상 승압이 가능하다.

제안회로는 위와 같은 방식을 채용함으로써 Super Cap. String의 개수와 배터리 셀의 개수를 저감하여 전체 회로의 부피 및 원가를 저감할 수 있다.

2.1 제안 회로의 모드 해석

제안된 회로는 스위치 SW의 도통 상태에 따라 2가지 모드가 있다. 각각의 모드에 따른 전류 도통경로는 그림 6과 같다. 그림 7은 각 모드에 따른 주요 전압, 전류 파형을 나타낸다.

모드 해석의 편의를 위해 다음과 같은 조건을 가정한다.

- i. 모든 소자는 이상적이다.
- ii. 모든 동작은 정상상태에서 해석한다.
- iii. V_{O1} , V_{O2} , V_O 의 리플은 매우 작다.

① Mode 1 (SW ON)

스위치 SW가 ON 될 때, 그림 6(a)와 같이 Mode 1이 시작된다. 이때 인덕터 L1, L2에 에너지가 Build up 되고, 다이오드 D1, D2는 도통되지 않는다.

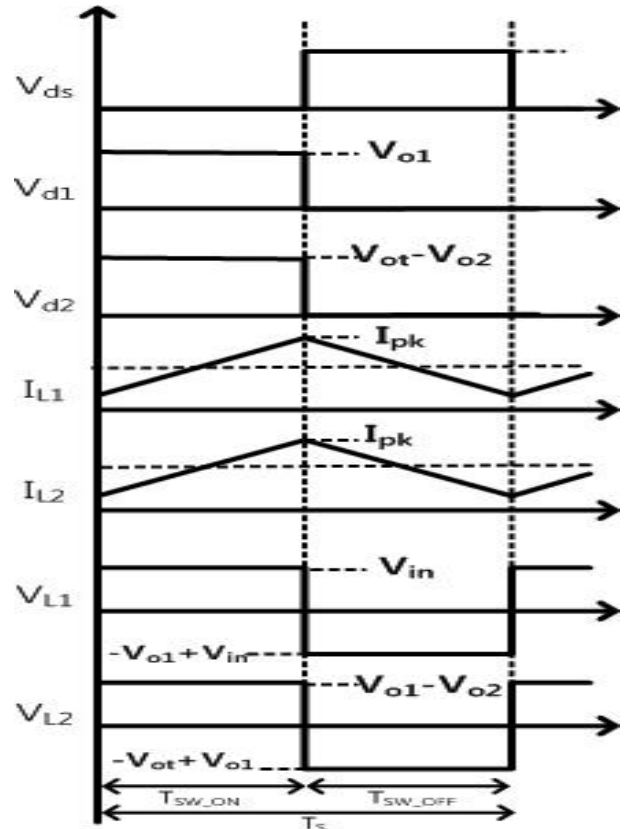


Fig. 7. Operating waveform of proposed circuit.

② Mode 2 (SW OFF)

스위치 SW가 OFF 될 때, 그림 6(b)와 같이 Mode 2가 시작된다. 이때 인덕터 L1, L2의 에너지를 Powering하고, D1, D2가 도통된다.

2.2 제안 회로의 입출력 관계식 유도

각각의 인덕터 L1, L2에 Voltage Second Balance를 적용하여 입출력관계식을 도출한다^[7].

1) 인덕터 L1의 경우

- SW ON 일 때, $V_{L1} = V_{in}$
- SW OFF 일 때, $V_{L1} = -V_{O1} + V_{in}$

Voltage Second Balance에 의해 다음과 같은 식(1)을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_{O1}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

(D = T_{SW_ON} / T_S)

2) 인덕터 L2의 경우

- SW ON 일 때, $V_{L2} = V_{O1} - V_{O2}$
- SW OFF 일 때, $V_{L2} = -V_{ot} + V_{O1}$

Voltage Second Balance에 의해 다음과 같은 식(2)을 얻을 수 있다.

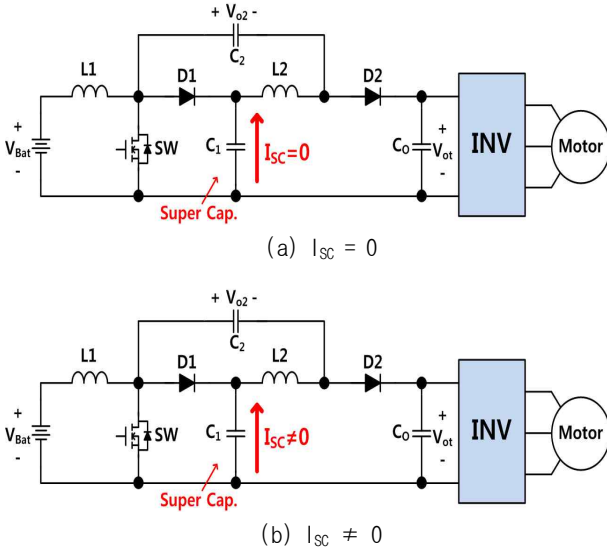


Fig. 8. Super cap. string ISC due to load.

$$\frac{V_O}{V_{O1}} = 1 + D \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 연립하여 풀면 다음과 같은 최종 입출력 관계식(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_O}{V_{in}} = \frac{1 + D}{1 - D} \quad (3)$$

기존 부스트 컨버터의 입출력 관계식은 다음과 같다.

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

예를 들어 기존 부스트 컨버터의 입출력 관계식에 $D = 0.5$ 를 대입할 경우 2배의 승압이 가능하다. 반면 제안 부스트 컨버터의 입출력 관계식에 $D = 0.5$ 를 대입할 경우 3배의 승압이 가능함을 확인 할 수 있다. 이를 통해 제안 부스트 컨버터는 기존 부스트 컨버터와 같은 $D(TSW_{ON} / TS: Duty)$ 를 가질 때 더 높은 승압이 가능함을 확인 할 수 있다.

2.3 제안 회로의 특징

1) 기존 부스트 컨버터를 이용하여 모터를 구동할 경우 배터리, Super Cap.의 개수가 증가하는 문제점이 있다. 반면 제안회로를 이용할 경우 높은 승압비로 배터리의 개수를 저감 할 수 있고, Super Cap.의 위치 변경을 통해 Super Cap. 개수 또한 줄일 수 있다.

2) 이동 카트에 실리는 짐의 무게에 따라 Light load와 Heavy load로 나누어진다.

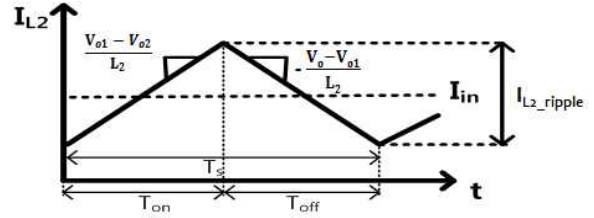
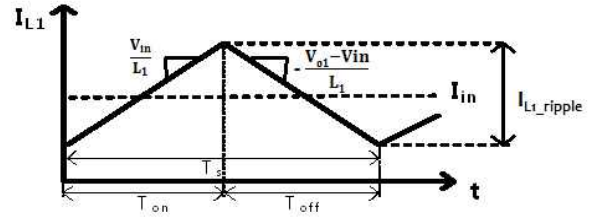


Fig. 9. Inductor's current waveform.

Light load일 경우, 입력전류는 제한전류보다 낮은 전류가 흐르고, 제안회로의 Super Cap. 평균 전류는 그림 8(a)와 같이 0이다. 그러므로 제안 부스트 컨버터의 출력 전류는 다음과 같다.

$$I_o = I_{in} * \frac{1 + D}{1 - D} \quad (5)$$

그러나 Heavy load일 경우, 입력 전류는 제한되고, 부족한 전류는 그림 8(b)와 같이 Super Cap.이 보충한다. 그러므로 제안 부스트 컨버터의 출력 전류는 다음과 같다.

$$I_o = I_{in} * \frac{1 + D}{1 - D} + I_{SC} \quad (6)$$

(I_{SC} : Super Cap. Current)

또한, Heavy load일 때, 입력 전류가 제한되므로 입력단의 전력이 제한된 것이나 마찬가지이다. 반면 출력단에서는 Super Cap.이 부족한 전류를 보충하므로 입력단 보다 큰 전력을 출력할 수 있다.

3) 이동 카트 시스템의 특성상 짐을 내려놓기 위해 모터를 기동하는 짧은 시간(0.2~1초)동안만 제안 부스트 컨버터가 동작하고, 그 외 시간에는 거의 무 부하 상태로 있다.

3. Design Guide

제안 자가발전 이동 카트 시스템을 위한 배터리 - 캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터의 인덕터 및 Super Cap.의 설계과정은 다음과 같다.

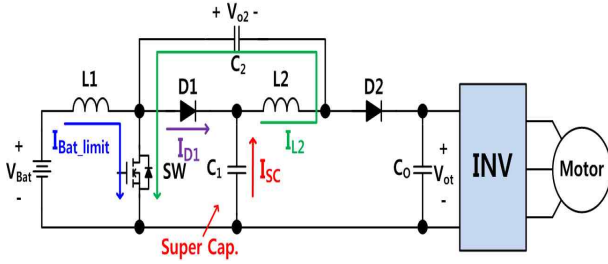


Fig. 10. Current flow during motor operation at SW ON.

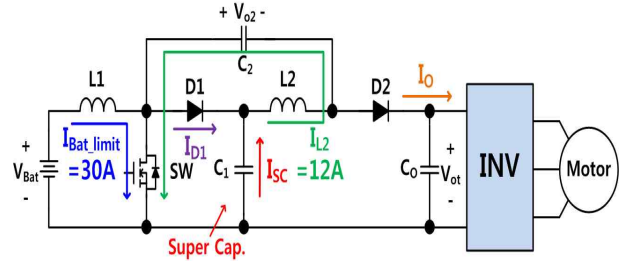


Fig. 11. Example of current flow during motor operation.

3.1 인덕터 L1, L2의 인덕턴스 설계

1) L1의 인덕턴스 설계

인덕터 L1의 인덕턴스를 구하기 위해서는 인덕터 L1의 전류 ripple의 식이 필요하다. 그림 9(a)를 통해 다음과 같은 전류 ripple 식(7)을 얻을 수 있다.

$$I_{L1_ripple} = \frac{V_{in}}{L_1} * D * T_s \quad (7)$$

식(7)을 L에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{V_{in} * D * T_s}{I_{L1_ripple}} \quad (8)$$

2) L2의 인덕턴스 설계

인덕터 L2의 인덕턴스를 구하기 위해서는 인덕터 L2의 전류 ripple의 식이 필요하다. 그림 9(b)를 통해 다음과 같은 전류 ripple 식(9)을 얻을 수 있다.

$$I_{L2_ripple} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{L_2} * D * T_s \quad (9)$$

식(9)를 L에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$L_2 = \frac{(V_{o1} - V_{o2}) * D * T_s}{I_{L2_ripple}} \quad (10)$$

3.2 Super Cap. C1의 캐패시턴스 설계

Super Cap. C1의 캐패시턴스를 구하기 위해서는 먼저 Heavy load 조건을 가정하고, C1이 공급하는 전류량을 계산하도록 한다. ($I_{L2} = I_o$)

첫째, 스위치에 흐르는 전류의 평균을 구해야한다. 스위치 SW가 ON되어 있을 때, 그림 10을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_{SW} = I_{Bat_limit} + I_{L2} \quad (11)$$

I_{SW} 의 평균 전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{SW} = (I_{Bat_limit} + I_{L2}) * D \quad (12)$$

둘째, 다이오드 D1의 평균전류를 구해야한다. I_{D1} 의 평균전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{D1} = I_{Bat_limit} - I_{SW} \quad (13)$$

식(13)에 식(12)을 대입하면 다음과 같다.

$$I_{D1} = I_{Bat_limit} - (I_{Bat_limit} + I_{L2}) * D \quad (14)$$

셋째, Super Cap. C1에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I_{SC} = I_{L2} - I_{D1} \quad (15)$$

식(15)에 식(14)를 대입하면 다음과 같이 식(16)으로 표현가능하다.

$$I_{SC} = I_{L2} - (I_{Bat_limit} - (I_{Bat_limit} + I_{L2}) * D) \quad (16)$$

식(16)를 통해 Super Cap. C1이 Heavy load 상황에서 공급하는 전류량을 알 수 있다.

C1의 캐패시턴스를 구하기 위해 다음과 같은 식을 이용한다.

$$Q = C * \Delta V = \Delta i * \Delta t \quad (17)$$

식(17)로부터 식(18)을 얻는다

$$C = \frac{\Delta i * \Delta t}{\Delta V} \quad (18)$$

Δi : 전류의 변화량
 Δt : 모터 기동시간
 ΔV : 전압의 변화량

식(18)에 앞서 구한 C1의 전류의 변화량과 모터가 기동하는 시간을 대입한다. ΔV 의 Super Cap. 전압의 변화량이다. 이는 설계자가 정하도록 한다.

위와 같은 식을 이용하여 최종적으로 Super Cap. C1의 캐패시턴스를 결정할 수 있다.

3.2.1 Super Cap. C1의 설계 예시(그림 11)

조건

- $I_{Bat_limit} = 30A$

TABLE I
SIMULATION CONDITION

| Components | Parameters |
|------------------------|------------|
| Input Voltage | 16 [V] |
| Output Voltage | 75 [V] |
| Input Current Limit | 30 [A] |
| Super Cap. Capacitance | 1.2 [F] |
| Switching Frequency | 100k [Hz] |

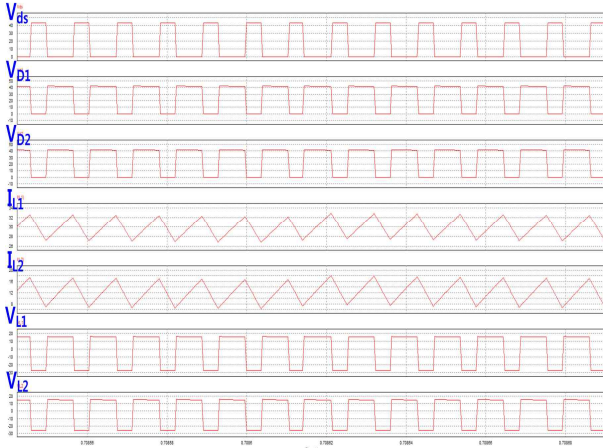


Fig. 12. Main waveform of simulation.

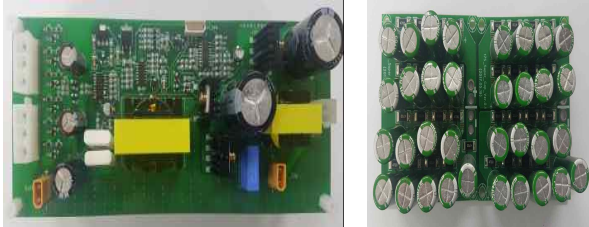


Fig. 13. Proposed capacitor bank assisted battery fed boost converter and super cap. string.

- D : 0.65
- $I_{L2}(= I_o) = 12A$
- 모터 기동시간 = 0.5초

위의 조건을 식(12)에 대입하면 I_{SW} 는 다음과 같다,

$$I_{SW} = (30 + 12) * 0.65 = 27.3[A] \quad (19)$$

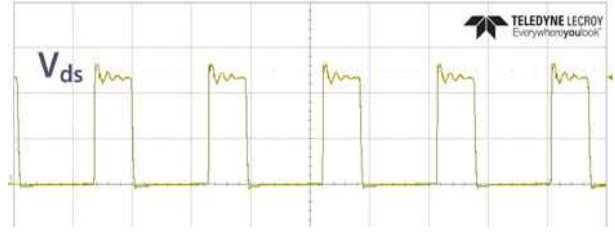
또한, 식(14)에 조건을 대입하면 I_{D1} 은 다음과 같다.

$$I_{D1} = 30 - 27.3 = 2.7[A] \quad (20)$$

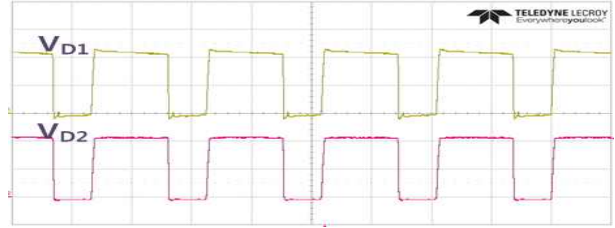
식(19), (20)을 식(15)에 대입하면 I_{SC} 는 다음과 같다.

$$I_{SC} = 12 - 2.7 = 9.3[A] \quad (21)$$

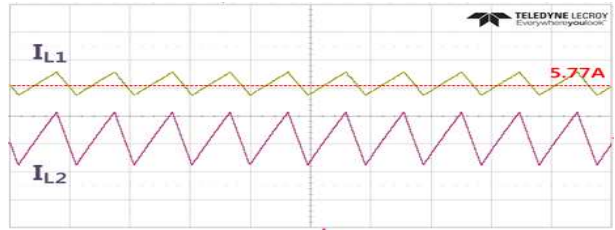
조건과 식(21)를 식(18)에 대입하여 Super Cap.의 캐패시턴스를 구할 수 있다. (ΔV 는 5V로 설정한다.)



(a) Waveform of switch voltage



(b) Waveform of diode(D1, D2) voltage



(c) Waveform of inductor current

Fig. 14. Waveform of dummy load condition.

$$C = \frac{9.3[A] * 0.5 [sec]}{5[V]} = 0.93 [F] \quad (22)$$

주어진 조건과 식을 통해 Super Cap. C1의 캐패시턴스는 0.93[F]이 필요하다.

4. 제안회로의 실험 결과

4.1 모의 실험 결과

앞서 설명한 자가발전 이동 카트 시스템을 위한 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터에 대한 타당성을 검증하기 위해 표 1의 조건하에서 모의실험을 수행하였다.

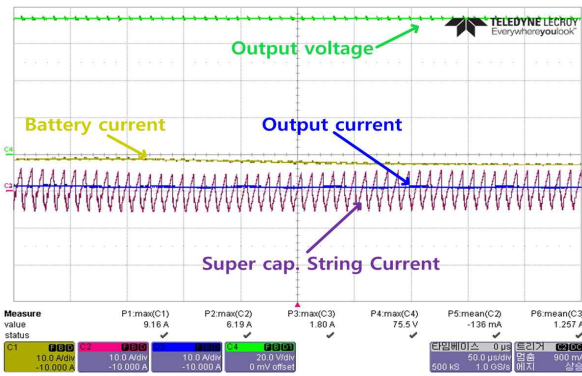
제안 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터의 동작원리에 대한 타당성을 검증하기 위해 표 1의 조건하에서 모의 실험을 수행하였다. 그림 12는 표 1과 같은 조건에서 수행된 제안회로의 모의실험 주요 파형을 보여준다. 이는 그림 6에서 각 모드에 따른 주요 전압, 전류 파형과 일치함을 확인 할 수 있다.

4.2 실험 결과

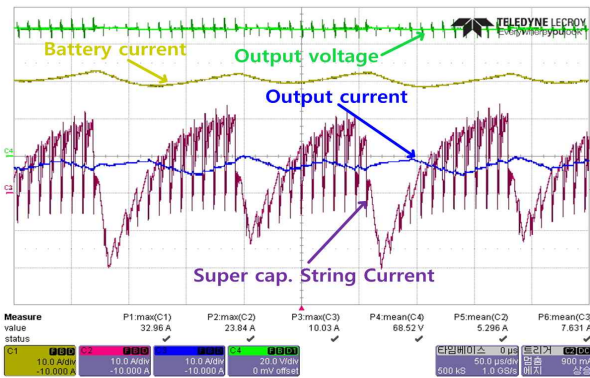
본 논문에서는 제안된 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터의 우수성을 검증하기 위해 시작품을 제

TABLE II
EXPERIMENTAL PARAMETERS OF PROPOSED
CIRCUIT

| Components | Parameters |
|--------------------|----------------------------------|
| Switch | FDP075N15A |
| Diode(D1, D2) | MBR30100CT |
| Current sensing IC | INA168 |
| Inductance(L1, L2) | 20uH, 10uH |
| Core(L1, L2) | EER3530S, EE2525S |
| Battery | 3.6V(4Series 4Parallel, 16EA) |
| Super Cap. String | 10F/2.7V(17Series 2Parrel, 34EA) |



(a) Waveform of light load condition



(b) Waveform of heavy load condition

Fig. 15. Waveform of real load condition.

작하여 실험을 진행하였다. 그림 13은 제안된 컨버터의 회로와 Super Cap. String이다. 표 2는 시작품의 파라미터이다.

4.2.1 더미저항을 통한 실험

그림 14는 $R_o = 60 \text{ ohm}$ 조건에서 컨버터의 주요 전압 및 전류 파형이다. 출력 전압은 75V로 기존 부스트 컨버터 보다 더 높은 승압비를 가지는 것을 확인 하였고, 평균 입력 전류는 5.77A로 약 90W를 확인하였다. 즉, Light load 조건임을 확인하였다. 또한, 실험 결과

파형을 통해 제안된 컨버터의 이론적 분석 결과 및 시뮬레이션 결과와 동일함을 확인하였다.

4.2.2 실제 이동카트 연동 실험

그림 15의 경우 실제 이동 카트에 제안하는 배터리-캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터를 적용하여 얻은 주요 파형을 나타낸 것이다.

그림 15(a)는 약 2.5kg의 짐을 투하하였을 때 주요파형이다. 즉, light load 상황으로 출력전압은 75V로 제어 되고, Super Cap. String의 평균 전류는 약 0A를 확인할 수 있다. 결과적으로 light load 상황에서 모든 에너지의 공급은 배터리에 의해 이루어진다.

그림 15(b)는 약 10kg의 짐을 투하하였을 때 주요파형이다. 이는 heavy load 상황으로 보이는 것과 같이 평균 입력 전류는 30A로 제한되어 배터리의 전류부담을 줄여준다. 이때, 입력 전류 제어로 출력 전압은 낮아지며 부족한 전류는 Super Cap. String(1.2F)이 보충해주는 것을 확인하였다. 즉 평균 입력 전류가 제한되어 입력 측 전력은 약 480W로 제한되지만, 출력 측 전력은 Super Cap. String이 부족한 전류를 공급하여 약 523W가 출력됨을 확인할 수 있었다. 만약 짐의 무게가 10kg 보다 더 무겁다면 Super Cap. String이 공급하는 전류는 커질 것이고, 출력 단의 전력은 더욱 커질 것이다.

이는 앞서 제시한 이론적 분석과 실험 결과가 일치함을 증명하였다. 따라서 본 논문에서 제시된 실험 결과를 통해 제안 회로는 더 높은 승압 비를 가지며 기존 보다 적은 개수의 배터리와 Super Cap. String 사용으로 기존의 방식과 동등한 효과를 보장한다.

5. 결 론

본 논문에서는 자가발전 이동 카트 시스템을 위한 배터리 - 캐패시터 뱅크를 갖는 부스트 컨버터를 제안하였다. 기존 부스트 컨버터를 이용해 이동 카트의 모터를 구동할 경우 많은 배터리, Super Cap. String이 필요하여 부피 및 원가 상승의 문제점이 있다. 기존 방식을 적용하였을 경우 Super Cap. String의 개수는 30Series 2Parallel(60개)로 제안 방식의 개수보다 약 1.8배의 Super Cap. String이 추가된다. 또한, 배터리의 개수는 7Series 3Parallel(21개)로 제안 방식의 개수보다 약 1.3배 많다. 이에 제안회로는 배터리와 Super Cap. String의 개수를 최소화하여 회로 전체 부피를 기존에 비해 20%이상 저감 하였다.

제안 회로의 동작 원리 및 모드해석, 모의 실험을 통해 이론적 분석을 하였다. 또한, 제안된 컨버터의 타당성 및 우수성을 검증하기 위해 프로토타입을 제작하여 저항부하 연동, 인버터 연동을 통한 하드웨어 실험을 수행하였다. 이를 통해 제안 부스트 컨버터는 3배 이상 승압이 가능함을 확인하였다. Heavy load 상황에서 배터리

전류는 제한되고, Super Cap. String이 전류를 보충해주는 것을 확인함으로써 제안회로의 유용성을 검증하였다.

이 논문은 한국씨엔에스와 국민대학교의 산학 연구 과제의 결과로 수행되었음 (S2016-0079)

References

- [1] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of power electronics," Second Edition, Kluwer Academic Publishers, pp. 71-76, 2013.
- [2] C. Sreekumar and V. Agarwl. "A hybrid control algorithm for voltage regulation in DC-DC boost converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 6, pp. 2530-2538, June 2008.
- [3] D. S. Kim, S. J. Kong, H. M. Yoo, K. S. Kang, and J. W. Roh, "Battery current limit control technique for life extension of E-bike's battery," *the Korean Institute of Power Electronics Annual Conference*, pp. 339-340, Jul. 2016.
- [4] S. J. Kong, D. S. Kim, S. M. Kim, K. S. Kang, and J. W. Roh, "Modified boost converter for EV using low voltage super capacitor string," *the Korean Institute of Power Electronics Annual Conference*, pp. 267-268, Jul. 2016.
- [5] I. Aizpuru, U. Iraola, J.M. Canales, M. Echeverria, and I. Gil "Passive balancing design for Li-ion battery packs based on single cell experimental tests for a CCCV charging mode," *International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 93-98, 2013.
- [6] "Designing switching voltage regulator with TL494," Texas Instruments, 1998.
- [7] M. Sanjaya, "Switching power supply design & optimization," Pressman, pp. 1-25, 2004.



공성재(孔盛載)

1992년 5월 5일생. 2016년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2016년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.



양태철(梁泰哲)

1992년 12월 30일생. 2017년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.



강경수(姜景琇)

1988년 9월 9일생. 2013년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.



노정욱(盧政煜)

1971년 9월 10일생. 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 2000년~2004년 삼성전자(주) 영상 디스플레이 사업부 책임연구원. 2014~2015년 미래창조과학부 대학 IT 인력 양성 사업(ITRC) 에너지-ICT 융합 연구센터 센터장. 2004년~현재 국민대 창의공과대학 전자공학부 교수.