

# 빠른 응답특성을 갖는 DC/DC 컨버터 하이브리드 전류 모드 제어기

오승민<sup>1</sup>, 백승우<sup>1</sup>, 김학원<sup>†</sup>, 조관열<sup>1</sup>

## Hybrid Current Mode Controller with Fast Response Characteristics for DC/DC Converter

Seung-Min Oh<sup>1</sup>, Seung-Woo Baek<sup>1</sup>, Hag-Wone Kim<sup>†</sup>, and Kwan-Yuhl Cho<sup>1</sup>

### Abstract

A wide-bandwidth current controller is required for fast charging/discharging of super capacitor applications. Peak current mode is generally used to accomplish fast charging/discharging because this mode has fast response characteristics. However, the peak current mode control must have a slope compensation function to restrain sub-harmonics oscillation. The slope must be changed accordingly if the controlled output voltage is varied. However, changing the slope for every changed output voltage is not easy. The other solution, selecting the slope as the maximum value, causes a slow response problem to occur. Therefore, we propose a hybrid mode controller that uses a peak current and a newly specified valley current. Through the proposed hybrid mode control, the sub-harmonic oscillation does not occur when the duty is larger than 0.5 because of the fast response.

**Key words:** Super capacitor, Peak current mode control, Sub-harmonics oscillation, Slope compensation

### 1. 서 론

환경오염 및 화석 에너지 고갈로 인해 재생 에너지 응용 분야의 연구 및 개발이 활발해지고 있다. 이러한 사회적 추세에 대응하여 철도차량 또는 자동차 업계에서는 환경 친화적인 전기 자동차 및 하이브리드 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 철도차량 분야에서는 철도 차량이 감속하였을 때 발생하는 운동 에너지를 전기 에너지로 바뀌어서 낭비되는 에너지를 저장하는 회생 제동에 대한 연구가 수행되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 회생 제동의 연구가 활발해지면서 전기 에너지 저장 장치의 중요성이 커지고 있는데 슈퍼 커패시터(Super Capacitor)는 충전 및 방전 사이클이 많고 수명이 길어서 다양한 분야에서 응용되고 있다<sup>[3]</sup>. 슈퍼 커패시터를 이용한 에너지 저장

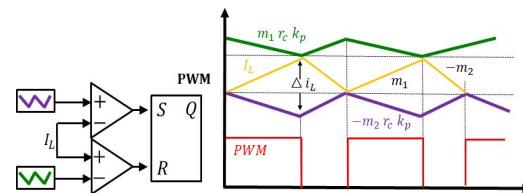


Fig. 1. Previous method for preventing sub-harmonic oscillation.

장치에 적용되는 전력변환 장치의 경우 슈퍼 커패시터의 고속 충 방전을 위해서 빠른 응답특성을 갖는 전압 제어기가 필요하다. 한편 전압제어기는 일반적으로 내부에 전류제어기를 갖는다. 슈퍼 커패시터를 위한 컨버터의 빠른 전압 응답을 얻기 위해서 내부의 전류제어기 역시 빠른 응답이 요구되며, 이를 위하여 피크 전류 모드 제어(Peak Current Mode Control, 이하 PCMC) 방식이 사용된다. 하지만 피크전류모드에서는 듀티가 0.5 이상일 때 저조파 발진(Sub-harmonic oscillation)문제가 발생한다<sup>[4]</sup>. 이 저조파 발진 문제를 방지하기 위해 가공의 삼각파를 사용하는 기울기 보상 방법(Slope compensation)이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 이 방법에서 기울기의 범위는 기울기 보상 방법의 입력 및 출력 전압에 따라 달라지므로 입력 또는 출력 전압변경에 따라 기울기를 변

Paper number: TKPE-2019-24-2-10

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

<sup>†</sup> Corresponding author: khw@ut.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea Nat'l Univ of Transportation  
Tel: +82-43-841-5322 Fax: +82-43-841-5320

<sup>1</sup> Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea Nat'l Univ. of Transportation

Manuscript received Nov. 11, 2018; revised Nov. 27, 2018; accepted Dec. 5, 2018

경해야한다. 그러나 슈퍼 커패시터는 전압이 급격하게 변하기 때문에 실제 출력 전압에 따라 기울기를 수시로 변경하는 것은 쉽지 않다.

따라서 입력 및 출력 전압 전 범위에서 저조파 발전 문제를 방지하기 위해 기울기 보상을 최대 기울기로 사용하는 것이 일반적이나, 최대 기울기보상 방법을 사용하면 응답 시간이 지연되는 문제가 발생한다<sup>[6]</sup>. 저조파 발전 문제를 해결하기 위한 다른 방법으로 최대 전류와 최소 전류를 이용한 전류 제어 방법이 제안되었다<sup>[7]</sup>. 그림 1은 최대 및 최소 전류를 사용하는 기존의 전류 제어 방법을 보여준다. 이 방법은 두 개의 위아래 삼각파를 사용한다. 이 방법에서 최대 전류는 상부 삼각파와 비교하고 최소 전류는 하부 삼각파와 전류를 비교한다. 그러나 이 방법에서는 상단 및 하단 과형의 기울기가 입력 및 출력 전압의 영향을 받기 때문에 입력 및 출력 전압 변경에 따라 하드웨어에서 수시로 기울기를 변경해야하는 동일한 문제가 존재한다. 이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 기울기 보상 방법이 아닌 피크 전류와 운전 조건에 따라 결정된 최소 전류(Valley Current) 명령을 사용하여 빠른 응답 특성을 갖는 새로운 하이브리드 전류 모드 제어기를 제안하고, 제안된 방식의 효용성을 실험적으로 검증한다.

## 2. 빠른 응답특성을 가지는 제어 설계 기법

### 2.1 기울기 보상(slope compensation)의 문제점

PCMC에서 컨버터 전류의 저조파 발생 문제를 막기 위해 피크 전류에서 삼각파를 빼서 입력 전류와 비교하는 기울기 보상 방법이 사용된다<sup>[5]</sup>. 기울기 보상을 사용하면 전류 섭동의 크기가 다음 PWM 주기에서 이전 PWM 주기보다 작아져서 저조파 발전을 방지한다. 식 (1)은 부스트 컨버터에서 인덕터 전류의 상승 및 하강 기울기를 보여준다.

$$m_1 = \frac{V_g}{L}, m_2 = \frac{V_o - V_g}{L} \quad (1)$$

여기서,  $m_1$ 은 인덕터 전류가 상승하는 기울기,  $m_2$ 는 인덕터 전류가 하강하는 기울기를,  $V_g$ 는 입력 전압  $V_o$ 는 출력전압을,  $L$ 은 부스트 인덕터의 값을 의미한다. 저조파 발전 문제를 줄이려면 전류 변동 계수의 크기가 1보다 작아야한다. 이를 위해 삼각파의 기울기 보상 값을 식 (2)와 같이 구해진다.

$$m_a > \frac{m_2 - m_1}{2} \rightarrow m_a > \frac{V_o - 2V_g}{2L} \quad (2)$$

여기서,  $m_a$ 는 삼각파의 기울기를 의미한다. 수식 (2)에서 출력 전압이 변경되면 기울기 값도 동시에 변경되어

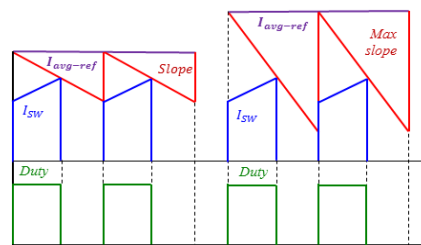


Fig. 2. The process of duty formation at different slopes.

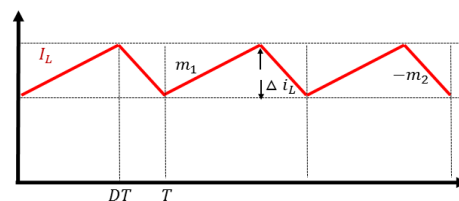


Fig. 3. Inductor current in steady state.

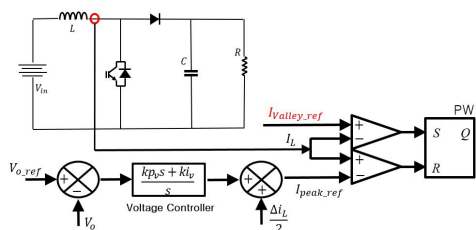


Fig. 4. Block diagram of the proposed hybrid controller.

야 하는 것을 알 수 있다. 하지만 슈퍼 커패시터와 같이 전압이 급격하게 변화하는 토폴로지에서는 실제 출력 전압으로 기울기를 수시로 변경하는 것은 어렵다. 그래서 일반적으로 기울기 보상 값을 저조파 발전 문제가 발생하지 않는 기울기보상의 최대로 설정한다. 그림 2는 일반 및 최대기울기보상을 사용 하였을 때 듀티가 형성되는 원리를 나타낸다. 최대기울기는 일반기울기보다 경사가 급해서 입력전류와 먼저 만나 작은 듀티를 만든다. 그러나 같은 듀티를 만들어 내기 위해서는 전압제어기에서 도출되는 전류 명령이 높아야한다. 여기서, 원래 값보다 더 많이 보상되어서 전류 제어기의 응답 지연 문제가 발생한다.

### 2.2 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어

본 논문에서는 피크 및 밸리 전류를 모두 사용하는 새로운 하이브리드 전류 모드 제어기를 제안한다. 제안하는 하이브리드 전류 제어기는 히스테리시스 전류 모드 제어기법과 유사하다. 이전의 히스테리시스 전류 모드 제어는 고정 된 밴드 갭(band-gap)을 사용한다<sup>[8]</sup>. 이 경우 입력 전압과 출력 전압이 바뀔 때 주파수가 변하는 문제가 발생한다. 하지만 본 논문에서 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어는 유기적으로 전류 밴드 갭을 변화시켜 입력 및 출력 전압이 변하더라도 스위칭 주파수를 고정시켜준다. 논문에서 제안하는 최소전류를 구하기 위해서는 전류 밴드 갭을 알아야한다. 그러기 위해서는

TABLE I  
SYSTEM PARAMETERS

Parameter	Value
Input Voltage	10[V]
Output Voltage	50[V]
Inductor	0.5[mH]
Capacitor	440[μF]
Max Slope	80k
Switching Frequency	20[kHz]

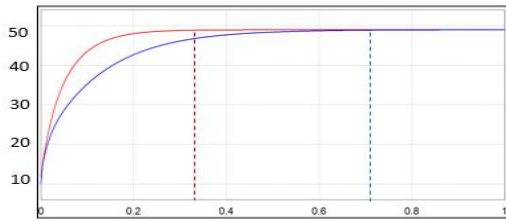


Fig. 5. A simulated waveform representing the response time of the output voltage at different controller.

인덕터 전류의 최대 전류와 최소 전류의 관계를 알아야 한다. 그림 3은 정상 상태의 인덕터 전류 파형을 나타낸다. 그림 3에서  $m_1$  은 인덕터 전류의 상승 기울기를 나타내고  $DT$ 는 인덕터 전류가 상승하는 시간을 나타낸다. 전류 밴드 갭인  $\Delta I_L$ 은 식 (3)과 같다.

여기서  $f$ 는 PWM 주파수를 의미한다. 식 (3)에서 전류 밴드 갭  $\Delta I_L$ 은 전류 상승 기울기와 상승 시간의 곱으로 나타난다. 따라서 밴드 갭은 입출력 전압 및 주파수 함수인 식 (3)에 의해 전류 상승 기울기에 의해 변화된다. 그리고 새롭게 구해지는 밸리 전류 명령은 피크 전류 명령에서 전류 밴드 갭을 빼주어서 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\Delta I_L = m_1 \times DT = \frac{V_g \times DT}{L} = \frac{V_g \times (V_o - V_g)}{L \times V_o \times f} \quad (3)$$

$$I_{Valley_{ref}} = I_{Avg_{ref}} + \frac{\Delta I_L}{2} - \Delta I_L \quad (4)$$

여기서,  $I_{Avg_{ref}}$ 는 전압제어기에서 도출되는 평균 전류 명령이다. 그림 4는 새롭게 구해진 최소전류를 이용하여 도출된 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 인덕터 전류가 피크 및 밸리 전류 명령과 비교되는 것을 알 수 있다. 여기서, 그림 1의 이전 방법과 그림 4의 제안 하는 방법의 차이점은 다음과 같다. 이전 방법에서, 저조파 발전문제를 제거하기 위해 상부와 하부에 두 개의 삼각파가 사용된다. 이 삼각파의 기울기는 입력 및 출력 전압의 영향을 받기 때문에 입력 및 출력전압 변화에 따라 변경되어야나, 하드웨어적으로 처음 설정한 기울기를 수시로 변경하기가 어렵다. 반면 제안 된 제어기는 식 (3)에서와 같이 소프트웨

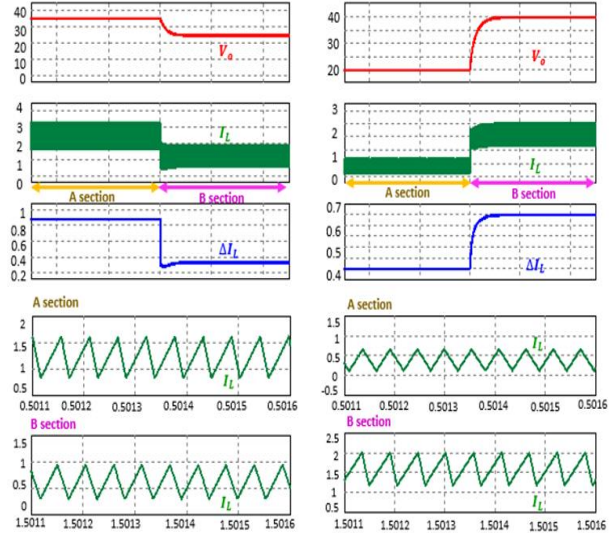


Fig. 6. Inductor current simulation waveform when the output voltage is dropped.

Fig. 7. Inductor current simulation waveform when the output voltage is raised.

어적으로 전류 밴드 갭을 계산하는 데 사용된다. 따라서 제안 된 제어기는 입력 및 출력 전압이 변하더라도 자체적으로 밴드 폭을 변화하기 때문에 주파수가 고정되는 장점이 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

일정한 보상 기울기를 갖는 피크 전류 모드 제어와 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어를 비교하기 위해 모의해석과 실험을 진행하였다. 표 1은 부스트 컨버터의 파라미터를 나타낸다. 실험 장비는 DC power board, Controller board로 구성되어 있으며, 그리고 디지털로 제어하기 위해 MCU 제어를 TI(Texas Instruments)의 TMS320F28377D를 이용하였다. 제어기 형태는 최대기울기를 이용한 피크 전류 모드 제어기와 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어기로 서로 다른 2가지의 제어기를 사용하였다. 그림 5는 최대 기울기 보상 방법을 포함한 피크 전류 모드 제어와 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어의 출력 전압 파형에 대한 모의해석 결과를 보여준다. 최대 기울기를 사용하는 경우 원래 보상 값보다 더 많이 보상되어서 시간 지연되는 문제가 발생하므로 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어가 더 빠른 응답 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

그림 6과 그림 7은 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어에서 출력 전압이 상승 및 하강되었을 때 인덕터 전류 파형에 대한 모의해석 결과를 보여준다. 히스테리시스 전류 모드 제어는 고정 된 밴드 갭을 사용해서 출력 전압이 변경 되었을 때 주파수가 변하는 문제가 발생하는데 반해, 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어는 출력 전압이 변경되면 동시에 전류 밴드 폭도 변화하기 때문에 주파수가 고정되는 것을 모의해석 결과를 통하여

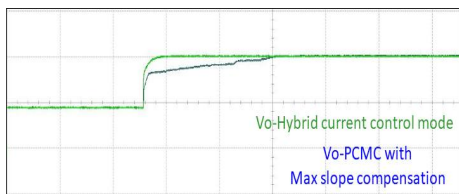


Fig. 8. Experimental waveforms that show the response time of the output voltage on different controllers. (50V/div, 500msec/div)

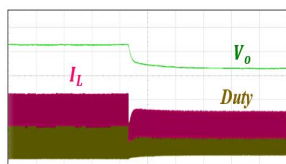


Fig. 9. Experimental waveform of inductor current when output voltage drops. (10V/div, 1A/div, 50msec/div)

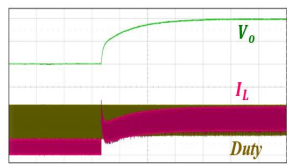


Fig. 10. Experimental waveform of inductor current when output voltage rises. (10V/div, 1A/div, 50msec/div)

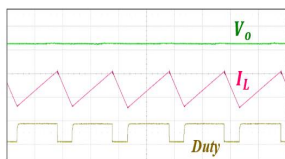


Fig. 11. Experimental waveform of inductor current before output voltage changes. (10V/div, 1A/div, 25usec/div)

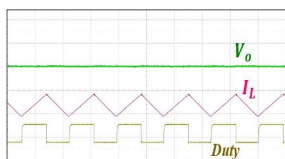


Fig. 12. Experimental waveform of inductor current after output voltage change. (10V/div, 1A/div, 25usec/div)

알 수 있다. 그림 8은 최대 기울기 보상 방법을 포함한 피크 전류 모드 제어와 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어의 출력 전압 파형에 대한 실험 결과를 보여준다. 모의해석과 같이 제안하는 하이브리드 전류 모드제어기가 더 빠른 응답 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10은 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어에서 출력 전압이 상승 및 하강되었을 때 인덕터 전류 파형에 대한 실험결과를 보여준다. 그림 11은 출력 전압이 상승 및 하강되기 전의 전류파형이고 그림 12는 출력 전압이 상승 및 하강 되었을 때 전류파형을 나타낸다. 모의해석과 같이 주파수가 고정되는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 빠른 응답 특성을 갖는 새로운 하이브리드 전류 모드 제어기를 제안한다. 제안하는 하이브리드 전류 모드 제어기는 최대전류와 최소전류를 검출

할 수 있으면 모든 컨버터에서 사용 가능하며 특히 커패시터의 고속 충전 방전이 가능하므로 전기 자동차 및 전동차 배터리팩용 양방향 DC-DC 컨버터에서 사용하면 많은 장점을 이끌어 낼 수 있다. 또한 모의해석과 실험을 통해 제안된 하이브리드 전류 모드 제어기는 최대 기울기 보상이 사용된 피크 전류 모드 제어기보다 응답 특성이 빠르다는 것을 확인하였고 출력 전압이 변하더라도 자체적으로 밴드 폭을 변화하기 때문에 주파수가 고정되는 것을 확인하였다.

이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (No. 201801180001) 본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030201100)

#### References

- [1] E. Schartz, A. Khaligh, and P. O. Rasmussen, "Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizein on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 8, 2009.
- [2] K. K. Jeon, H. S. Hwang, S. J. Choi, D. H. Yang, S. H. Hwang, H. R. Park, and S. B. Choi, "Development of reliability evaluation technology for green car regenerative braking system PART-(1)," in *KSAE 2010 Spring Conference*, 2010.
- [3] S. Singh, M. Singh, and S. C. Kaushik, "Optimal power scheduling of renewable energy systems in microgrids using distributed energy storage system," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, No. 9, pp. 1328-1339, Oct. 2016.
- [4] G. Zhou, J. Xu, J. Wang, and Q. Mu, "Elimination of sub-harmonic oscillation of digital average current control buck converter," *Fujian*, pp. 1314-1318, 2008.
- [5] Y. Hu, Y. Wei, J. Wang, and M. Sun, "Design of slope compensation for a high-efficiency high-current DC-DC converter," *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, Hangzhou, pp. 1306-1308, 2016.
- [6] J. Park, "A design of peak current-mode DCDC buck converter with ESD protection devices," *IKEEE*, Vol. 17, pp. 77-82, Mar. 2013.
- [7] S. Kapat, "Parameter-insensitive mixed-signal hysteresis-band current control for point-of-load converters with fixed frequency and robust stability," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 32, No. 7, pp. 5760-5770, Jul. 2017.
- [8] G. Zhou, J. Xu, C. Mi, and Y. Jin, "Effects of modulations on the sub-harmonic oscillations of digital peak current and digital valley current controlled switching DC-DC converters," in *IEEE 6th Int. Power Electronics and Motion Control Conf.(IPEMC)*, pp. 1347-1352, May 2009.