한국동력기계공학회지 제23권 제1호 pp. 35-40 2019년 2월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.1.035
Vol. 23, No. 1, pp. 35-40, February 2019

회생 댐퍼 시스템을 위한 양방향 DC-DC 컨버터 제어기법
Control of Bidirectional DC-DC Converter for Regenerative Damper System

정영석*†
Young-Seok Jung*†

(Received 31 August 2018, Revision received 16 January 2019, Accepted 28 January 2019)

Abstract: This study presents a novel control method of bidirectional DC-DC converter for the regenerative damper system in a vehicle. In conventional method to control the bidirectional DC-DC converter, one of the two modes of converter operations are selected with the information of input and output voltages to avoid the instabilities of current control loop, which makes the control complicated. To avoid this, a simple PWM control method is presented in this paper. The validities of the proposed method is proven by circuit level simulation results.

Key Words : Biderectional DC-DC Converter, Regeneative Damper System, PWM Control

1. 서 론

최근 차량의 구동에 따라 발생하는 운동에너지로부터 전기에너지를 얻기 위한 여러 방법들에 대해 연구되고 있다. 특히 차량의 상하 진동을 감쇠하기 위해 기존에는 쇼크 업소버(shock absorber)를 사용하였으나 차량의 상하 운동에너지를 열에너지 형태로 소비하였다. 이에 차량의 연비 향상과 환경에 대한 문제 해결을 위해 상하 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 시스템인 회생 댐퍼 시스템에 대한 연구가 활발하다.[1)]

회생 댐퍼 시스템은 댐퍼 시스템으로부터 전기에너지를 얻기 위해 전동기를 사용하게 되며 차량의 상하 운동 속도에 따라 전동기의 회전속도가 가변하게 된다. 하지만 차량의 배터리 전압은 거의 일정하므로 전동기의 모든 운전속도에 사용하기에 효율적이지 않다. 특히 고속운전에서는 과도한 전기에너지 회생이 발생할 수 있어 전압을 가변할 수 있는 DC-DC 컨버터의 활용이 고려되었다. DC-DC 컨버터를 활용함으로써 전동기 회전속도에 따라 인버터에 인가되는 전압을 가변할 수 있으며 최적의 회생 시스템을 구성할 수 있어 이 시스템에 대한 연구가 진행 중이다.

본 논문에서는 회생 댐퍼 시스템에 적용 가능한 비절연형 DC-DC 컨버터를 위한 새로운 PWM 제어 방식에 대해 기술한다. 비절연형 DC-DC 컨버터를 제어하는 기존의 제어방식은 입력전압과 출력전압의 정보를 바탕으로 부스트(승압) 또는 벅(강압) 동작 상황임을 판단하고 댐퍼시스템으로 에너지의 공급인지 회생인지를 판단하여 스위칭할 스위치를 선정하여 제어한다.[2-6)] 이런 기존의 복잡한 제어방식을 개선하여 컨버터 출력전압과 인덕

*† 정영석(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8086-6928) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과

*† Young-Seok Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8086-6928) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

터의 전류제어만으로 간단히 에너지의 회생 및 공급이 가능한 PWM 제어방식을 제안하고자 한다.

2. 기존의 비절연형 양방향 DC-DC 컨버터 제어기법

Fig. 1은 회생 댐퍼 시스템을 위한 비절연형 양방향 DC-DC 컨버터를 나타낸 것이다. 스위치 S1~S4와 인덕터 L, 그리고 출력 커패시터 C로 구성되어 있으며 출력 커패시터는 출력단의 회생 댐퍼와 인버터에 의해 연결되어 있다. 기존의 양방향 DC-DC 컨버터 제어방식은 입력전압과 출력전압의 관계를 기준으로 벅모드(강압모드)와 부스트모드(승압모드)를 선택적으로 택하여 그에 맞는 적절한 스위치를 제어하는 방식을 사용한다. 예를 들어 입력전압이 출력전압보다 낮은 부스트모드에서는 스위치 S1은 항상 도통시키고 S2는 항상 오프시키며 스위치 S3와 S4는 상보적으로 동작시

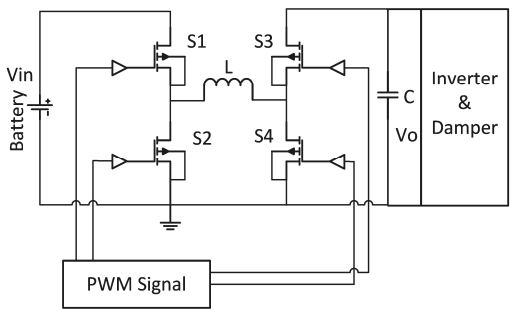


Fig. 1 Non-isolated bidirectional DC-DC converter for regenerative damper

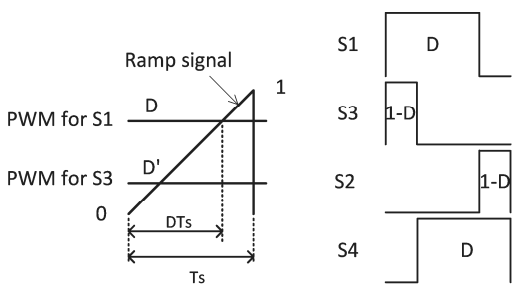


Fig. 2 PWM signal generation and PWM signals for switches

킨다. 반대로 입력전압이 높은 벅모드에서는 스위치 S3는 도통시키고, S4는 오프시키며 스위치 S1과 S2를 서로 상보적으로 작동시킨다.[6] 이는 각 모드에 따라 제어 불능이 발생하지 않도록 하기 위함이다. 입출력전압의 상태에 따라 적절한 동작을 선택적으로 하여야 과도한 전류응답이 발생하지 않으며 안정적인 동작이 보장될 수 있다. 그리고 댐퍼 시스템이 모터링 상황인지 회생 상황인지에 따라 상보적으로 동작하는 두 스위치에 인가하는 PWM 시비율의 값도 적절히 달리 조절해야 한다.

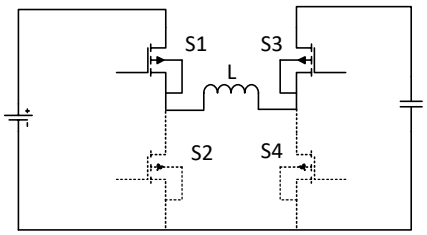
본 논문에서는 이런 문제를 쉽게 해결할 수 있는 PWM 제어기법을 제안한다.

3. 새로운 PWM 제어기법

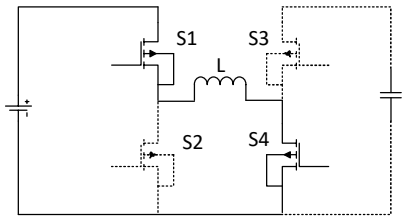
새로운 PWM 제어기법은 우선 스위치 S1에 인가하는 시비율을 D로 하고 스위치 S3에 인가하는 시비율을 1-D로 한다. 그리고 스위치 S2와 S4는 스위치 S1과 S3의 상보적 신호를 인가한다. 즉 S2의 시비율은 1-D가 되며 S4의 시비율은 D가 된다. 스위치 S1과 S3에 인가하는 신호는 동기되어 같은 시점에 도통을 시작한다. 이를 구현하는 PWM 신호는 Fig. 2와 같다. 스위치 S1과 S3을 위한 PWM 신호는 램프신호와 각각 비교하여 PWM를 발생시키며 스위치 S2 및 S4는 S1 및 S3와 서로 상보적 신호를 가진다.

제안한 방식에 의한 컨버터 동작은 Fig. 3과 같이 4가지 모드를 가진다. 모드 1은 입력과 출력이 서로 인덕터를 통해 연결된 상태로 입력전압이 출력전압보다 높으면 인덕터 전류는 증가하고 입력전압이 낮으면 인덕터 전류는 감소한다.

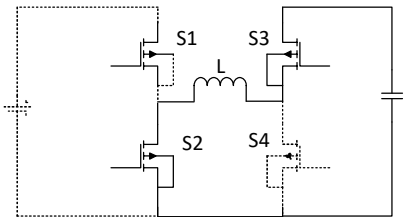
모드 2와 모드 3은 인덕터가 입력 혹은 출력에만 연결된 상태이며 모드 4는 입력과 출력 모두에 연결되지 않는 상태로 인덕터 전류는 일정한 값을 유지한다. 입력 전압과 출력 전압의 관계에 따른 인덕터 전류의 리플전류 파형은 Fig. 4에 나타나 있다. 출력전압이 높은 부스트 동작에서는 모드 1, 2, 4가 사용되며 출력전압이 낮은 벅 동작에서는 모드 1, 3, 4가 사용된다.



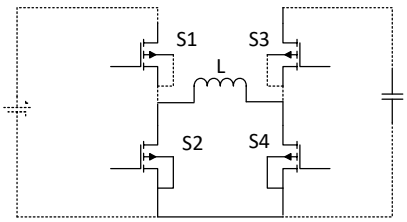
(a) mode 1



(b) mode 2



(c) mode 3



(d) mode 4

Fig. 3 Operational modes bidirectional DC-DC converter

4. 새로운 PWM 제어기법을 적용한 양방향 컨버터 특성 분석

이 장에서는 새로운 PWM 제어기법을 적용한 양방향 DC-DC 컨버터의 정적 특성을 해석한다. 우선 시비율에 따른 입력전압에 대한 출력전압 이득은 인덕터의 자속 밸런스 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있으며, 이는 기존의 벅-부스트 컨버터와 동일하다. 즉 시비율 D값이 0.5보다 작으면 출력전압이 입력전압보다 낮은 벅모드이며, D값이 0.5보다 크면 출력전압이 높은 부스트모드이다.

$$V_o = \frac{D}{1-D} V_{\text{in}} \tag{1}$$

식 (1)로부터 제안한 방식의 PWM 제어에 의해 모든 입출력전압 조건에 대해 만족하는 시비율을 결정할 수 있어 출력 전압가변이 가능한 회생 댐퍼 시스템의 적용에 적합하고 그 구현 또한 기존 방식보다 간단함을 알 수 있다. 제안한 방식은 기존 방식보다 간단한 제어 구조이면서 다른 잇점 또한 가지고 있다. Fig. 4에 나탄 것처럼 인덕터 전류의 리플 크기가 모드 4의 활용으로 기존 제어 방식보다 작아짐을 알 수 있다. 부스트 동작의 경우 모드 1 구간에의 전류의 변화량으로 전류 리플의 크기를 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

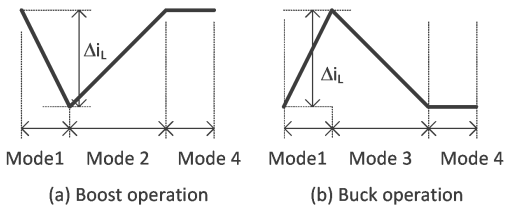


Fig. 4 Inductor current waveforms for boost/buck operations

$$\Delta i_L = \frac{(V_o - V_{\text{in}})}{L}(1-D)T_s$$
$$= \frac{T_s}{L}\frac{(V_o - V_{\text{in}})\cdot \quad V_{\text{in}}}{V_o + V_{\text{in}}} \tag{2}$$

반면 벅 동작의 경우 모드 1 구간에서의 전류 리플의 크기는 다음과 같다.

$$\Delta i_L = \frac{(V_{\text{in}} - V_o)}{L} DT_s$$
$$= \frac{T_s}{L}\frac{(V_{\text{in}} - V_o)\cdot \quad V_o}{V_o + V_{\text{in}}} \tag{3}$$

양방향 DC-DC 컨버터를 기존 방식으로 동작할 경우의 인덕터 전류 리플 크기는 다음과 같다.

$$\Delta i_L = \frac{T_s}{L}\frac{(V_o - V_{\text{in}})\cdot \quad V_{\text{in}}}{V_o} \quad \text{for Boost}$$

$$\Delta i_L = \frac{T_s}{L}\frac{(V_{\text{in}} - V_o)\cdot \quad V_o}{V_{\text{in}}} \quad \text{for Buck} \qquad (4)$$

Fig. 5는 출력전압을 48 V로 고정한 상태에서 입력전압의 변화에 따른 기존 방식과 제안한 방식을 적용할 경우의 인덕터 전류 리플의 크기를 나타낸 것이다. 해석에서 사용한 인덕턴스(L)는 100 uH이다. 기존의 방식에 비해 제안한 방식에 의한 인덕터 전류 리플의 크기가 모든 구간에서 작게 나타남을 확인할 수 있다.

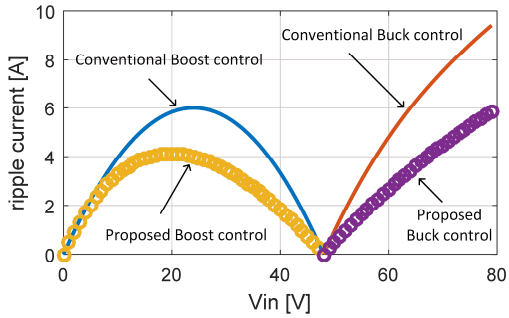


Fig. 5 Magnitude of inductor current ripple for proposed and conventional PWM controls with varying input voltages and constant output voltage(48 V)

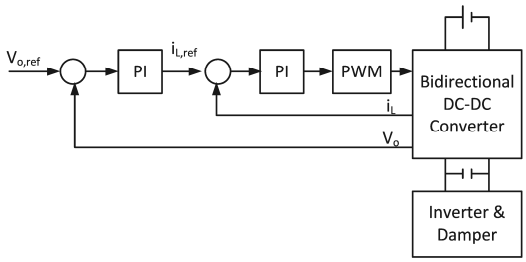


Fig. 6 Control block diagram for bidirectinal DC-DC converter

Table 1 Parameters of bidirectional DC-DC converter

Parameters	Value	Unit
Nominal Output voltage : V_o	48	V
PWM frequency : f_s	20	kHz
Inductance : L	100	μH
Output Capacitance : C	47	mF

제안한 방식에 의한 제어기는 기존의 입출력전압상태를 고려하여 제어하려는 스위치를 정한 후 해당 스위치에 인가할 시비율을 결정하는 방식에 비해 쉽게 제어기를 구성할 수 있다. 출력전압을 제어하는 제어기와 그 출력으로 인덕터 전류를 제어하는 제어기로 구성한다. Fig. 6은 양방향 DC-DC 컨버터제어를 위한 제어 구성도를 나타낸 것이다.

5. 시뮬레이션 결과

제안한 방식의 유효성을 검증하기 위해 스위칭 모델 기반 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 사용하여 평가하였다. Fig. 7은 평가에 사용된 PSIM 모델을 나타낸 것이다. Table 1에는 시뮬레이션에 사용한 파라미터를 나타내었다. Fig. 8은 입력전압이 40 V, 56 V이고 출력전압이 48 V일 때의 정상상태에서의 출력전압, 인덕터 전류파형과 인덕터 전류 리플 크기를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타낸 것과 같은 인덕터 전류리플 크기를 나타냄을 확인할 수 있다. 인덕터 전류 파형에서 전류의 기울기가 0인 구간이 있음도 확인가능하다. Fig. 9는 회생 댐퍼의 동작 중 480 W급의 모터링과 에너지 회생이 10 ms 주기로 반복될 때의 DC-DC 컨버터의 출력전압과 인덕터 전류의 응답파형을 나타낸 것이다. 보다 빠르고 안정적인 동작을 위해서는 보다 세밀한 제어기 설계가 이루어져야 하지만, 본 논문에서는 회생댐퍼 시스템의 기존방식과 다른 PWM 제어기법 소개에 중점을 두고 있어 제어기설계는 대략적으로 진행하였다. 하지만 제안한 PWM방식을 사용한 경우 급작스러운 회생과 모터

링 동작에 대해서도 안정적인 동작이 이루어짐을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 회생 댐퍼시스템에서 에너지의 공급과 회생이 가능한 비절연형 DC-DC 컨버터의 제어를 위한 새로운 방식의 간단한 구조인 PWM 제어기법을 소개하였다. 기존의 방식은 입력전압과출력전압의 상태를 감시하고 스위칭 동작을 하게할 스위치를 에너지 공급 및 회생시 마다 판단하여야 하는 문제를 가지고 있었으나, 제안한 방식은 단순히 출력전압 및 인덕터 전류를 제어할 제어기의 구성만으로 쉽게 에너지 공급 동작 및 회생이 이루어짐을 확인하였다.

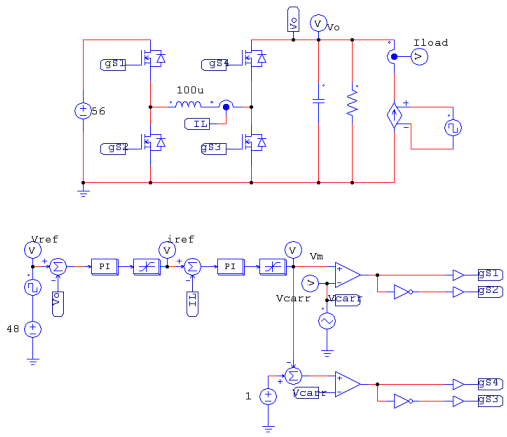


Fig. 7 PSIM simulation model

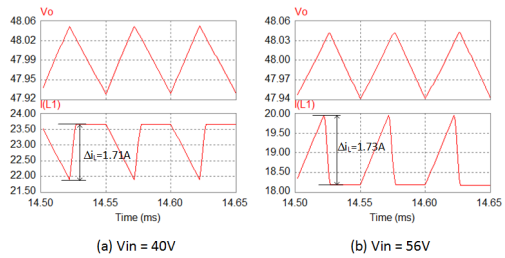


Fig. 8 Output voltage and inductor current waveforms when input voltages are (a) 40 V and (b) 56 V with output voltage 48 V

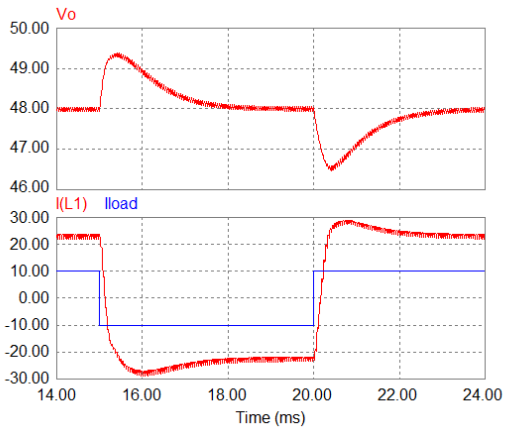


Fig. 9 Output voltage and inductor current waveforms for the changes of load current from 10 A (motoring) to －10 A (regeneration) and vice versa

References

1. D. Y. Jo, S. Y. Kwak and N. G. Kim, 2011, "Development of Fuel-efficient Construction Equipment", IEEE 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, pp. 31-37. (DOI:10.1109/ICPE.2011.5944374)
2. S. H. kim, J. J. Hur, B. D. Jeong, and K. K. Yoon, 2017, "Improved DC - DC Bi-directional Converter", Journal of the Korean Society Marine Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 76-82.
3. O. Cornea, G.-D. Andreescu, N. Muntean, and D. Hulea., 2017, "Bidirectional Power Flow Control in a DC Microgrid Through a Switched-Capacitor Cell Hybrid DC－DC Converter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 4, pp. 3012-3022. (DOI:10.1109/TIE.2016.2631527)
4. C. C. Lin, L. S. Yang, and G. W. Wu, 2013, "Study of a non-isolated bidirectional DC － DC converter", IET Power Electronics, Vol. 6, No. 1, pp. 30-37. (DOI:10.1049/iet-pel.2012.0338)
5. J. K. Kim, S. T. Kim, D. Y. Cho, and G. W. Moon, 2011, "A New Non-Isolated High Step-up

Converter with Reduced Voltage Stress", IEEE 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, pp. 68-75. (DOI:10.1109/ICPE.2011.5944544)

6. D. Y. Woo, C. S. Kim and S. J. Park, 2016, "Bi-directional DC-DC Converter for ESS using the Droop Control", IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, June 1-4. (DOI:10.1109/ITEC-AP.2016.7512971)