

하이브리드 전기자동차용 양방향 DC-DC Converter 제어 알고리즘 개발

오두용, 구분관, 남광희
포항공대

Development of the Bidirectional DC-DC Converter Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles

Doo-Yong Oh, Bon-Gwan Gu, Kwang-Hee Nam
Pohang university of science and technology

ABSTRACT

The design of DC-DC converters for power electronic interfaces in power management systems for Hybrid Electric Vehicle (HEV) is a very challenging task. In this paper, the considered topology is the bi-directional buck-boost converter and inverter system.

If we make the converter side DC link current the same as the inverter side DC link current in a converter-inverter system, no current will flow through the DC link capacitor and as a result, no DC link voltage variation occurs. This leads to the possibility of reducing small th size of DC link capacitors which are expensive, bulky.

Therefore we propose the converter current controller which can manage to match inverter and converter current at the DC link.

1. 서 론

하이브리드 자동차의 효율을 높이고 출력을 향상 시키기 위해서 배터리와 인버터 사이에 양방향 DC-DC 컨버터를 추가시킨 토폴로지가 쓰인다. 하이브리드 시스템에서 효율을 떨어뜨리는 가장 주된 요소는 Copper loss이다. 이를 해결하기 위해서 시스템 전압을 높여 전류의 양을 줄임으로써 손실 전력을 최소화 할 수 있다. 따라서 하이브리드 자동차의 구성요소인 배터리의 낮은 전압은 Boost Converter를 이용하여 DC link 전압을 상승시킴으로써 전력손실을 최소화 할 수 있다. 또한 시스템 전압이 높아졌기 때문에 정격 전압이 높은 모터의 장착이 가능해져 출력 향상을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 하이브리드 자동차 시스템의 효율

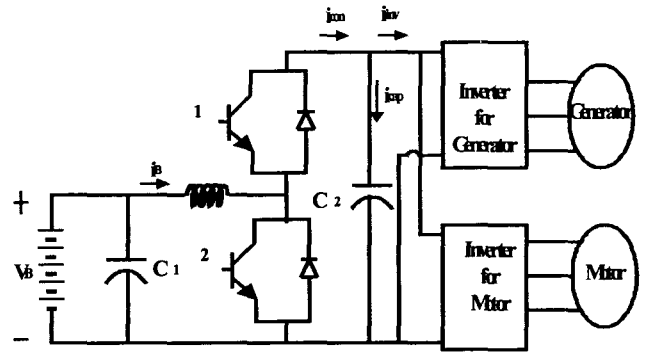


그림 1 하이브리드 전기 자동차 시스템
Fig. 1 A system of Hybrid Electric Vehicle

과 출력향상을 가져온 양방향 DC-DC 컨버터 중 buck-boost type에 대하여 구성요소인 DC_link 캐패시터 용량을 줄일 수 있는 제어기를 제안하고 시뮬레이션을 통해 검증하도록 한다.

2. 하이브리드 시스템

그림 1은 하이브리드 전기 자동차 시스템에서 양방향 buck-boost 컨버터가 추가된 모델을 보여주고 있다.^{[1][2]} 배터리가 인버터와 직접 연결된 방식도 있지만 이는 낮은 배터리 전압 때문에 효율과 출력면에서 낮은 성능을 보인다. 따라서 위의 그림과 같이 컨버터를 추가한 토폴로지가 최근 많이 쓰인다. 그림 1에서 배터리 뒤에 있는 캐패시터는 배터리 전압 리플을 최소화하는 필터 캐패시터이다. 그리고 인버터와 스위치 소자 2개가 추가되어서 배터리의 충전과 방전이 가능하다.

동작원리는 배터리의 방전모드와 충전회생모드 2가지로 나누어서 설명할 수 있다. 우선 방전모드에서는 1번 스위치가 꺼진 상태에서 2번 스위치가 스

위치를 한다. 그러면 양방향 buck-boost 컨버터는 boost 컨버터와 함께 동작하고 배터리 전압을 증압시켜 DC link 전압을 상승시킨다. 회생모드에서는 반대로 2번 스위치가 꺼진 상태에서 1번 스위치가 스위칭을 함으로써 buck 컨버터 형식으로 동작하며 이때 배터리에 전류가 흘러들어가서 충전을 시키게 된다.

3. 제안하는 컨버터 제어 알고리즘

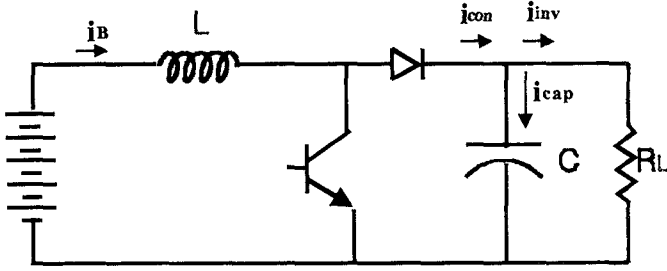


그림 2 Boost mode에서 하이브리드 시스템
Fig. 2 A hybrid system when it operates boost mode

그림2는 배터리에서 모터로 전력이 흐르는 boost mode를 나타낸 것이다. 이 논문에서는 방전과정만을 고려하도록 하겠다. 여기서 캐패시터의 용량을 줄이려면 전압의 리플이 작게 해야 하고 이를 위해 i_{cap} 의 변화가 없도록 제어해야 한다. 즉 그림2에서 i_{con} 와 i_{inv} 가 같다면 i_{cap} 이 없어져서 캐패시터의 전압 변동이 일어나지 않는다.^[3] 하이브리드 시스템에서 이 캐패시터는 고전압의 대응량으므로 용량을 줄인다면 비용과 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다.

3.1 제어기 설계

그림 2의 컨버터의 Inductor 전류식과 Main Capacitor의 전압식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L}(v_B - v_C(1-D)) \quad (1)$$

$$= \frac{1}{L}(v_B - v_1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_{con} - i_{inv}) = \frac{1}{C}i_{cap} \quad (2)$$

$$v_1 = v_C(1-D) \quad (3)$$

$$i_{cap} = i_{con} - i_{inv} \quad (4)$$

여기서 i_B 는 배터리 전류, i_{con} 는 컨버터에서 DC link로 나가는 전류, i_{inv} 는 DC link 쪽에서 인버터로 나가는 전류, i_{cap} 은 DC link 캐패시터로 들어가는

전류를 의미한다. 그리고 v_B 는 배터리 terminal 전압, v_C 는 DC link 캐패시터 양단 전압, D는 듀티를 나타낸다.

그리고 스위치 소자에서 소모되는 전력이 없다고 가정하면 배터리에서 공급되는 전력은 DC link 캐패시터 쪽으로 흐르는 전력과 같다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P = i_B v_B = i_{con} v_C \quad (5)$$

$$i_{con} = \frac{v_B}{v_C} i_B \quad (6)$$

i_{inv} 는 그림1의 시스템에서 모터의 상전류를 측정하는 전류센서와 로터의 회전수를 측정하는 엔코더가 있으면 이 전류를 계산할 수 있다. 여기서 인버터의 스위치에 의한 손실이 없다고 가정하고 전력에 대한 식을 유도하여 i_{inv} 를 구한다.

$$P_{inv} = \frac{3}{2}(i_{ds}^e v_{ds}^e + i_{qs}^e v_{qs}^e) = v_C i_{inv} \quad (7)$$

$$i_{inv} = \frac{3}{2v_C}(i_{ds}^e v_{ds}^e + i_{qs}^e v_{qs}^e) \quad (8)$$

$$i_{cap} = i_{con} - i_{inv} = \frac{v_B i_B}{v_C} - \frac{3}{2v_C}(i_{ds}^e v_{ds}^e + i_{qs}^e v_{qs}^e) \quad (9)$$

여기서 v_{ds}^e 와 v_{qs}^e 는 동기좌표계에서의 고정자 d-q 전압이고, i_{ds}^e 와 i_{qs}^e 는 동기좌표계에서의 고정자 d-q 전류이다.^[5]

이 논문에서는 캐패시터의 용량을 줄이는 컨버터 제어가 목적이므로 i_{inv} 은 배터리의 정격파위에 의해 낼 수 있는 최대 크기로 설정한다.

따라서 v_C 를 일정하게 유지하고 i_{cap} 에 흐르는 전류를 최소화 하기 위해 다음과 같은 제어를 제안한다.

$$v_1^* = -(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(i_{cap}^* - i_{cap}) + v_B - sL\frac{v_C}{v_B} \quad (10)$$

$$i_{cap}^* = (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(v_C^* - v_C) \quad (11)$$

k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} 는 PI gain이고 s는 미분연산자이다. 그림 3은 DC link 전압을 duty를 이용하여 제어하는 방법을 나타낸 것이고 그림 4는 제안한 제어기 (eq. 9,10)를 사용하여 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

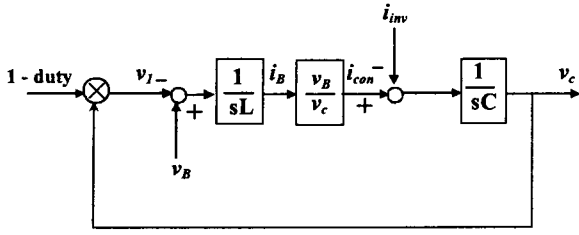


그림 3 일반적인 Boost 컨버터 제어 모델
Fig. 3 Conventional control model of Boost Converter

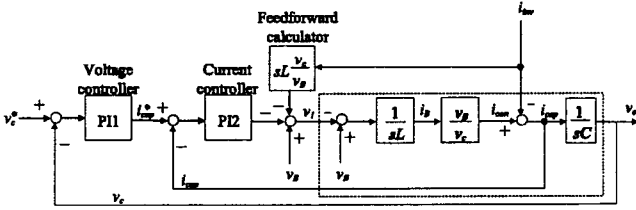


그림 4 제안하는 Boost 컨버터 제어기
Fig. 4 The proposed controller of Boost Converter

4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 Matlab Simulink를 사용하여 모의 실험을 수행하였다. 일정한 Duty를 이용하여 출력 전압을 내는 일반적인 boost converter 제어방식과 전류제어기가 추가된 제안된 제어방식을 이용하여 비교분석한다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표1과 같다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 The system parameters

v_B	200 V	PI1 P_gain	25
L	241.6 μH	PI1 I_gain	1
C	1500 μF	PI2 P_gain	0.1
배터리 정격 파워	20 kW	PI2 I_gain	0.1
Duty	0.6		

인버터에 흐를 수 있는 전류의 최대량은 배터리 정격 파워와 DC link 전압에 종속된다. 인버터에 흐르는 전류가 최대일때 DC link 전압의 리플이 커진다. 그리고 하이브리드 자동차의 가속 또는 출발 시 컨버터가 boost 모드로 동작하며 일반주행일때는 컨버터가 동작하지 않는다. 따라서 인버터에 흐르는 전류는 최대 40 A, 최저 0 A로 반복하는 사다리꼴 입력을 넣도록 한다.

실험방법은 사다리꼴 형태의 i_{inv} 를 일반적인

boost 컨버터와 제안한 제어기를 넣은 컨버터에 넣고 DC link 전압 리플의 크기를 관찰한다. 또한 i_{inv} 의 주기가 달라질 경우 2가지 제어 모델에 어떤 영향을 끼치는지 알아본다.

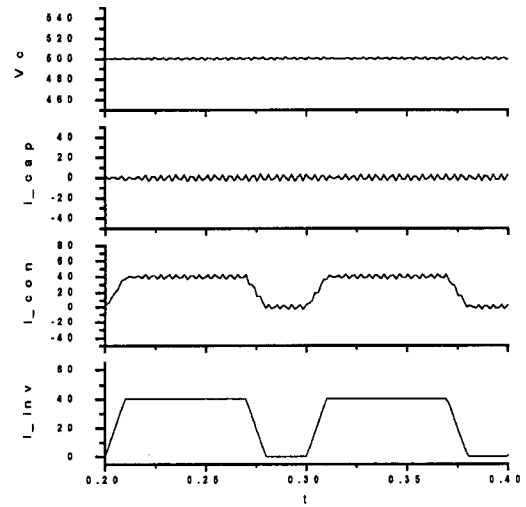
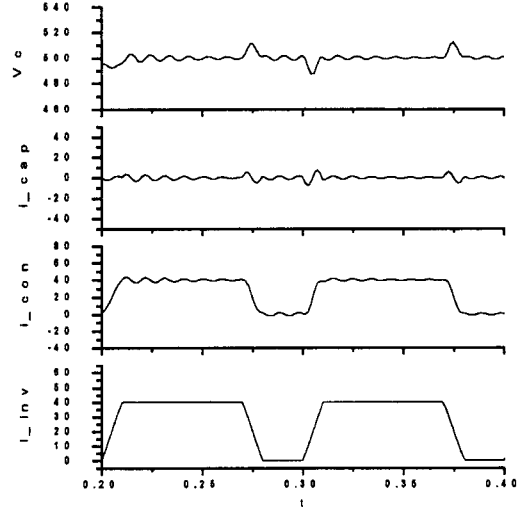


그림 5 Boost 컨버터의 파형 (i_{inv} 주기 = 0.1s)

Fig. 5 Waveform of the Boost Converter

그림 6 제안된 제어기를 포함한 Boost 컨버터의 파형 (i_{inv} 주기 = 0.1s)

Fig. 6 Waveform of the Boost Converter with the proposed controller

그림 5은 duty가 0.6으로 고정된 boost 컨버터에서 i_{inv} 가 40A, 0A로 반복되는 사다리꼴 모양으로 흐를때 캐패시터 양단의 전압과 i_{cap} , i_{con} 의 파형을 나타낸 것이다. 캐패시터 양단의 전압리플이 ± 10 이다. 그림 6은 제안한 제어기를 이용한 모델을 똑같은 i_{inv} 조건에서 실험한 것이다. 그림 5에 비해서

v_C 의 리플이 상당히 작음을 알 수 있다. 그리고 i_{con} 도 i_{inv} 의 모양을 비슷하게 따라가고 있다.

5. 결 론

하이브리드 전기자동차 시스템에서 양방향 DC-DC 컨버터가 사용된 이유는 시스템 전반에 걸친 에너지 효율을 상승시키는 것이다. 하지만 Boost 컨버터를 사용함으로써 높은 DC link 전압과 작은 전압리플을 만족시키기 위해서 높은 내압과 용량을 지닌 캐패시터를 선택해야한다. 이로 인해 비용이 증가하고 시스템의 부피가 커지는 문제점이 생겼다.

이 논문에서는 인버터로 나가는 전류에 따라서 컨버터의 duty를 가변하여 $i_{con} = i_{inv}$ 가 되도록 만들어 주는 전류제어기를 제안하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제어기가 인버터로 나가는 전류의 빠른 변화에도 기존의 boost 컨버터 제어방식보다 우수한 응답특성을 지니고 있음을 보였다.

따라서 제안한 제어기는 고정된 듀티를 가진 boost 컨버터에 비해 부하의 변화에 대한 응답특성을 향상시킴으로써 캐패시터에 흐르는 전류의 변화를 최소화 했다.

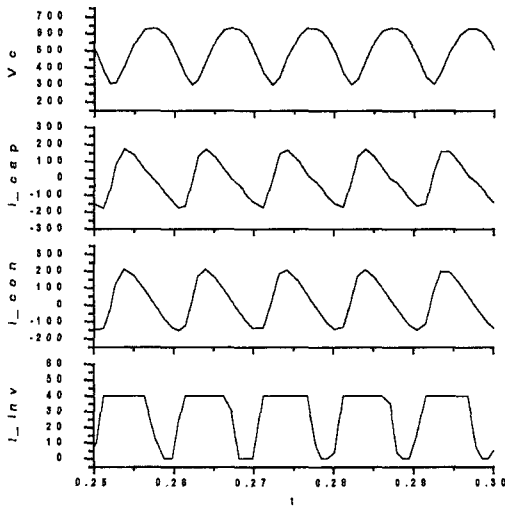


그림 7 Boost 컨버터의 파형 (i_{inv} 주기 = 10ms)

Fig. 7 Waveform of the Boost Converter

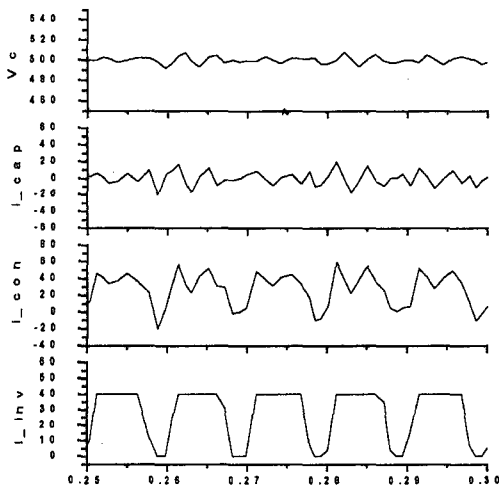


그림 8 제안된 제어기를 포함한 Boost 컨버터의 파형 (i_{inv} 주기 = 10ms)

Fig. 8 Waveform of the Boost Converter with the proposed controller

그림 7과 8은 i_{inv} 의 주기를 10ms로 설정했을 때의 파형이다. 일반적인 boost 컨버터는 DC link 전압의 리플이 $\pm 100V$ 이고 제안한 제어기를 쓴 boost 컨버터는 $\pm 10V$ 이다. 이 결과를 통해 제안한 제어기가 응답특성이 우수함을 알 수 있다.

이 논문은 포항공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] "Comparing DC-DC Converter for Power Management in Hybrid Electric Vehicles", *Schupbach, R.M.; Balda, J.C.*; Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE
- [2] "Study of bi-directional buck-boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives" *Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Capponi, F.G.; Solero, L.*; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual, Volume: 1, 15-19 Feb. 1998 Pages:287 - 293 vol.1
- [3] "A DC link Capacitor Minimization Method through Direct Capacitor Current Control" *Bon-gwan Gu; Kwang-hee Nam.*
- [4] "A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor" *Jinhwan Jung; Sun-Kyoung Lim; Kwanghee Nam.*; Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, Volume: 2, 12-15 Oct. 1998 Pages:1497 - 1503
- [5] "Vector Control and Dynamics of AC Drives" *D. W. Novotny; T.A. Lipo*; CLARENDON Press, 1996.