

모드전환을 고려한 양방향 DC-DC 컨버터의 디지털 전압 제어기 설계

조영창, 임지훈, 송승호, 최주엽, 이국선*, 최익*, 권태석**, 이상준**, 이현동**
 광운대학교 전기공학과, 광운대학교 제어계측공학과*, 현대모비스**

Digital Voltage Controller Design for the Bi-directional DC - DC Converter during Mode Change

Young-Chang Jo, Ji-Hoon Lim, Seung-Ho Song, Ju-Yeop Choi, Kook-Sun Lee*, Ick Choy*,
 Tae-Suk Kwon**, Sang-Joon Lee**, Hyun-Dong Lee** ,

Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ.

Dept. of Information and Control Eng. Kwangwoon Univ.*, Hyundai Mobis**

ABSTRACT

HEV(Hybrid Electrical Vehicle)의 배터리와 전동기/발전기 용 인버터 사이에 전력의 흐름에 따라 바뀌어 동작하는 양방향 컨버터가 장착된다. 이 컨버터는 낮은 배터리의 전압을 승압해 DC-Link 전압을 높혀줌으로써 전동기의 전류용량을 낮춰 줄 수 있으며 그에 따른 전동기의 부피를 감소시키고 손실을 줄이는 역할을 한다. 본 논문에서는 HEV에서 사용되는 양방향 컨버터의 모드 전환을 포함한 디지털 제어 방법을 소개하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

화석 연료 고갈로 인하여 차량의 동력원이 기존의 내연 기관에서 전기로 대체 되고 있으며 이에 따라서 기존 동력원과 전기 에너지를 함께 사용하는 HEV(Hybrid Electrical Vehicle)의 연구가 활발히 진행 되고 있다. 그 결과 다양한 HEV 전기 동력 시스템이 개발되었으며 배터리와 출력단 (DC-Link) 사이에 고승압 / 고효율의 양방향 컨버터를 장착하는 구조가 많이 쓰이고 있다.

양방향 컨버터는 Boost와 Buck의 두 가지 모드로 제어 가능하며, 배터리 방향으로 전류가 들어가는 경우 (즉, 배터리의 충전을 의미 한다.) Buck 모드로 동작하며, 인버터 단으로 전류가 흘러가는 경우 (배터리의 방전) Boost 모드로 동작한다. 이 때 Boost/Buck 모드의 전환은 DC-Link 단의 전류의 방향에 의해 결정되어 지는데, 모드의 전환 시 추가적인 기타 조건들을 고려하여 적절한 제어를 수행함으로써 안정적인 모드의 변환이 가능하다.

본 논문에서는 동작영역(CCM/DCM)과 컨버터의 종류(Buck/Boost)를 고려하여 모드 전환 시 발생하는 전압 변동을 최소화하는 디지털 제어기 설계를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 검증하도록 한다.

2. 본론

2.1 양방향 DC-DC 컨버터

본 논문에서 사용한 토폴로지는 가장 기본적인 비절연형 단상 Half-bridge 구조이다. 배터리가 컨버터 좌측 단에 연결되

고, Motor와 Generator의 전력의 차이가 컨버터 우측 단으로 입력된다. DC-Link의 전압을 일정하게 유지시켜 주는 역할은 양방향 컨버터가 담당하고, 인버터는 전력의 흐름에 변화하는 일종의 전류원으로 볼 수 있다.

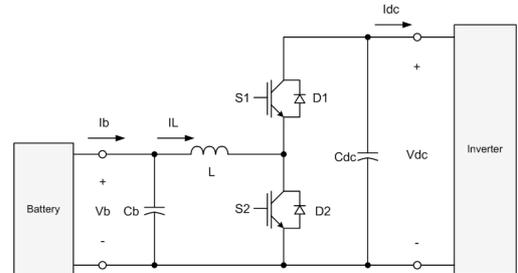


그림 1 양방향 컨버터 구조
 Fig. 1 Bi-directional converter's topology

2.1.1 양방향 DC-DC 컨버터의 기본 동작

스위치1(S1)이 동작할 때, 스위치2(S2)를 OFF시켜 다이오드 2(D2)가 도통되어, DC-Link에서 배터리 측으로 전류가 흐르는 Buck 동작을 수행한다. 반대로 스위치2(S2)와 다이오드 1(D1)을 이용하면 배터리에서 DC-Link측으로 전류가 흐르는 Boost 동작이 가능하다.

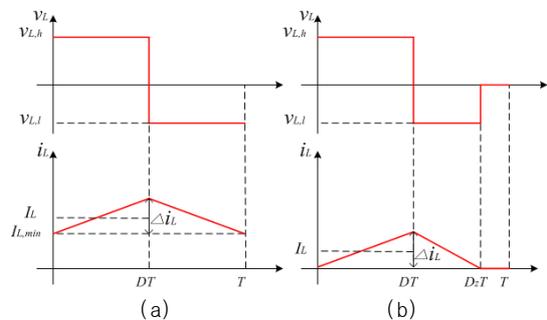


그림 2 인덕터의 전압 및 전류 파형 (a)CCM (b) DCM
 Fig. 2 Inductor Voltage and Inductor Current (a)CCM (b)DCM

DC-DC 컨버터는 인덕터에 흐르는 전류(IL)의 모양에 따라 연속모드와 불연속모드로 나눌 수 있으며 그림 2와 같은 파형

으로 나타낼 수 있다. 그림 2의 위에 있는 파형은 스위칭에 의하여 인덕터에 걸리는 전압을 나타내고, 아래의 파형은 흐르는 전류를 나타낸다. (a)의 경우에는 전류연속모드(CCM)이며 (b)의 경우에는 전류불연속모드(DCM)이다.

Buck모드로 동작할 때의 인덕터에 걸리는 전압과 흐르는 전류의 관계를 이용하여 식을 전개하면 식 (1)과 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$I_o = \frac{(V_i - V_o)D}{2Lf} + I_{\min}, \text{ where } D = \frac{V_o}{V_i} \quad [\text{Buck}](1)$$

식 (1)의 I_o 는 출력 전류의 평균, V_i, V_o 는 입력 전압과 출력 전압을 나타낸다. L 은 인덕턴스, f 는 스위칭 주파수이며 I_{\min} 은 인덕터 전류가 가장 낮을 때의 값이다. 이 때, 주의할 점은 Buck모드이기 때문에 입출력이 반대라는 점이다. 즉, 입력단이 DC-Link이고 출력단이 Battery다. ($V_i = V_{dc}, V_o = V_b, I_o = I_b$) 그림 4 (b)에서 볼 수 있듯이 전류의 불연속이 일어나는 지점은 I_{\min} 의 값이 0이 되는 지점이 되며 그 지점을 나타내는 인덕턴스 값인 L_{cri} 를 전개하면 다음과 같다.

$$L_{cri} = \frac{(V_i - V_o)D}{2Lf} \quad [\text{Buck}](2)$$

여기서 계산된 L_{cri} 의 값이 실제로 사용된 인덕터의 L 보다 클 경우에 DCM으로 동작하며, 반대의 경우에는 CCM으로 동작한다. L 과 L_{cri} 의 비를 Lambda ratio라고 부르며 식으로 나타내면 식 (3)과 같다. 즉, λ 가 양의 값이면 CCM, 음의 값이면 DCM이라고 볼 수 있다.

$$\lambda = \frac{L}{L_{cri}} \quad (3)$$

같은 방법으로 Boost mode의 식을 유도하면 다음과 같으며, 이 때 입력단이 Battery고 출력단이 DC-Link다. ($V_i = V_b, V_o = V_{dc}, I_o = I_{dc}$)

$$I_o = \frac{V_i(1-D)D}{2Lf} + I_{\min}(1-D), D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad [\text{Boost}](4)$$

$$L_{cri} = \frac{V_i(1-D)D}{2Lf} \quad [\text{Boost}](5)$$

2.2 디지털 전압 제어기 설계

본 양방향 컨버터의 전압 제어기는 디지털 방식으로 설계되었으며, 널리 사용되는 PI 제어기를 이용했다. 출력은 IGBT 스위치를 PWM(Pulse Width Modulation)으로 구동하기 위한 duty이다. Boost의 경우 0~0.8, Buck의 경우 0~1까지 제한되며, 리미트로 인한 적분기의 포화를 방지하기 위해 Anti-windup이 추가되어있다. 특이사항이 있다면, Buck 모드 일 경우에도 배터리측이 아닌 DC-Link의 전압을 제한한다는 것이다.

2.2.1 Buck / Boost 모드 전환

양방향 컨버터의 모드는 배터리의 충전전시의 전력의 부호에 따라 결정된다. DC-Link 전압 지령치는 일정하다고 가정하

면 출력전류의 부호가 전력의 부호를 결정하기 때문에, I_{dc} 를 이용하여 양방향 컨버터의 모드를 결정한다. 본 설계에서는 I_{dc} 를 5회 평균 낸 값의 부호를 판단하여 음의 값일 때는 Buck으로, 양의 값일 때는 Boost로 모드를 전환한다.

또한, 모드 전환 시 추가적으로 DC-Link 전압값도 고려해야 한다. 일정 전압(예를 들어 지령치의 110[%])이상으로 증가한 경우에는 Buck 모드로 S1를 스위칭시켜 DC-Link Capacitor에 차오른 전압을 감소시킨다. 반대로 DC-Link 전압이 감소한 경우(지령치의 90[%])에는 Boost 동작이 필요하다.

2.2.2 계산된 duty를 이용한 초기값 선정

양방향 컨버터의 모드 전환 시, 기존의 PI 제어기 적분항을 초기화해 줄 필요가 있다. 이 때, 적분항을 0으로 초기화를 시킬 것이 아니라, 우리가 승압하고자하는 출력에 해당하는 duty를 미리 계산하여 적용한다면, duty가 안정적이고 보다 빨리 정상화 되는데 도움이 된다.

CCM에서의 duty값은 입력전압과 출력전압을 이용해 쉽게 계산할 수 있으며 DCM의 경우에도 λ 를 이용해 간략하게 나타낼 수 있다. 각 모드 별로 duty를 계산하는 식은 표 1에 기술되어 있다. 물론, λ 를 계산하기 위해서는 인덕턴스, 스위칭 주파수, 입,출력 전압, 출력 전류에 대한 정보가 필요하다.

표 1 모드에 따른 듀티 계산 식
Table 1 Expression of the duty by Mode

Mode	Buck	Boost
CCM	$D = \frac{V_o}{V_i}$	$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$
DCM	$D_{DCM} = D\sqrt{\lambda}$	$D_{DCM} = D\sqrt{\lambda}$

2.2.3 CCM / DCM에 따른 Gain 값 선정

CCM일 경우에 duty는 출력전류가 증가할수록 컨버터의 손실이 증가하게 되므로 duty가 변화하지만, 변화의 정도는 그리 크지 않다. 하지만, DCM의 경우에는 λ 의 크기에 따라 duty가 변화하게 되며, 결국 전류의 크기에 따라 변화한다. 즉, CCM의 경우와 DCM의 경우에 따라 PI 제어기의 Gain 값을 다르게 적용해야 한다는 것이다.

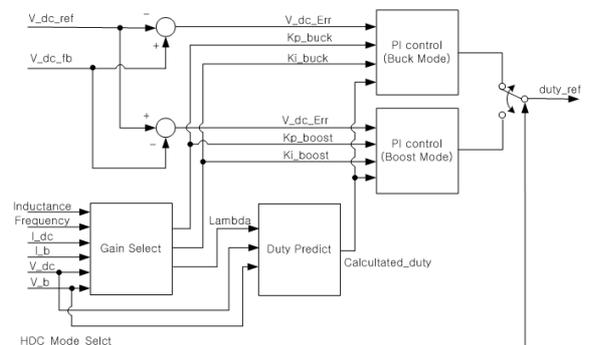


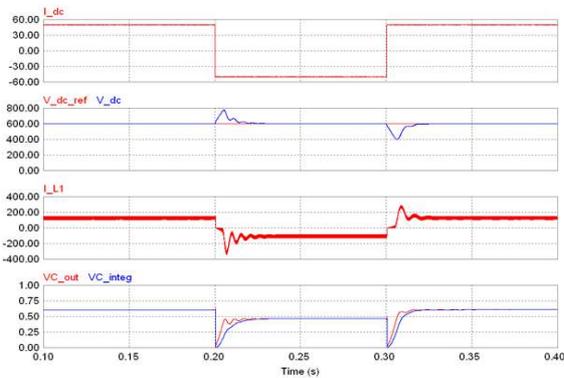
그림 3 제안된 디지털 전압제어기
Fig. 3 Proposed Digital Voltage Controller

식 (2)와 식 (5)를 이용해 각 모드(Buck/Boost) 별로 CCM/DCM이 되는 전류 구간을 판정하고, 각 모드별로 미리 계산된 PI Gain을 적용시킨다. 그림 3은 duty 초기값을 계산하

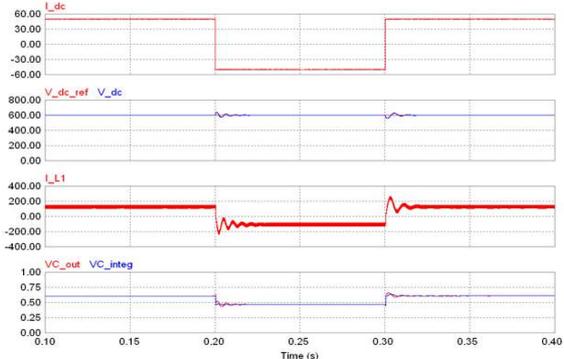
는 루틴과 CCM/DCM에 따른 Gain값을 결정해주는 루틴을 추가한 제안된 디지털 전압제어기의 블록도를 보여준다.

3. 시뮬레이션

앞 서 본문에서 제안한 모드전환이 고려된 디지털 제어기를 시뮬레이션으로 검증하도록 한다. 시뮬레이션 툴은 PowerSIM사의 PSIM을 이용하고, DLL(Dynamic Link Library)을 이용해 디지털 제어기를 구현했다. 배터리는 SoC(State of Charge)에 따라 250~270[V]까지 가변하는 모델을 적용하고, 인버터는 가변 전류원으로 모델링하였다. 스위칭 주파수는 10[kHz], DC-Link 전압 지령치는 600[V], 출력 전류는 50[A], 정격 출력이 30[kW]가 되도록 했다. 또한, 실제와 비슷한 환경을 위하여 I_{dc}에 1[App]의 노이즈를 추가해 주었다.



(a) 기존의 PI제어기를 적용한 결과

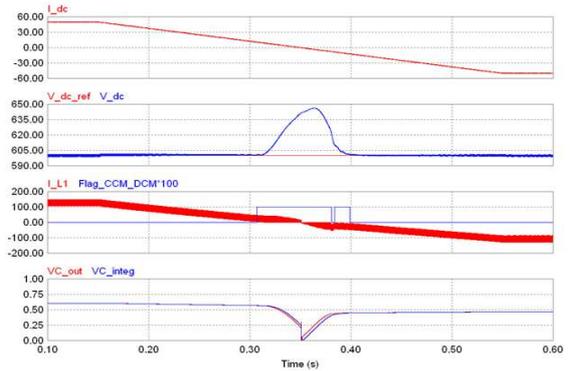


(b) 제안된 PI제어기를 적용한 결과

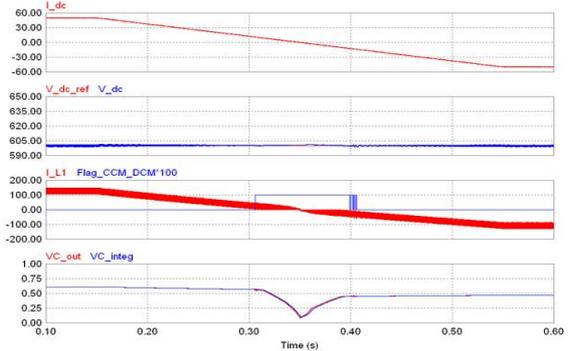
그림 4 스텝 부하의 모드 전환 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation of Load Step Change

그림 4는 전류부하를 50[A] → -50[A] → 50[A]으로 스텝 변경했을 때의 부하 변동시험 결과이다. 인버터 전류의 모양을 확인하면 부하의 변동에 따라 컨버터의 모드가 Boost → Buck → Boost로 변화하였음을 볼 수 있다. 제안된 디지털 전압제어기를 적용하였을 경우 전압의 오버슈트가 178.27[V]에서 38.76[V]까지 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 스텝 변화는 CCM에서 이루어졌으므로 duty를 예측해서 적용한 경우의 특성을 보여준다. 여기서, VC_{out}은 전압제어기의 출력인 duty이며, VC_{integ}은 적분항을 뜻한다.

그림 5는 전류부하를 50[A] → -50[A]까지 -150[kW/s]의 기울기 속도를 가지고 변경했을 때의 부하 변동시험 결과이다.



(a) 기존의 PI제어기를 적용한 결과



(b) 제안된 PI제어기를 적용한 결과

그림 5 기울기를 가지는 부하의 모드전환 시험 (Boost->Buck)
Fig. 5 Simulation of Load Slope Change

기존의 PI제어기를 사용했을 때는 44.84[V]의 전압 오버슈트가 발생하던 것이, CCM/DCM에 따라 Gain 값을 변경시켰을 때에는 2.97[V], duty를 미리 계산하여 초기값을 적용했을 때는 1.85[V]까지 줄어들었다. 기울기를 가지는 부하 변동 시에는 CCM/DCM에 따른 Gain값 변동에 대한 영향이 절대적인 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

최대 부하 시험 조건에서의 시뮬레이션 결과, Step 부하 모드 전환 시에는 78[%], Slope 부하 모드 전환 시에는 95[%]만큼의 전압 리플 감소를 확인할 수 있었다. 본 논문을 통해 아날로그 제어기로는 구현하기 복잡한 duty 초기값 계산 및 CCM/DCM에 따른 Gain 값 선정을 간단하게 구현 할 수 있는 디지털 제어기를 제안했으며, 현재 TI사의 TMS320F2812을 이용한 실험을 진행 중이다.

참고 문헌

- [1] T.A. Burress, et al, Evaluation of the 2007 Toyota Camry Hybrid Synergy Drive System, Oak Ridge National Lab. Jan. 2008.
- [2] 유창규, 이우철 “방향 전환이 자유로운 양방향 DC/DC 컨버터 개발” 전기학회논문지, pp. 224-230, 2006, 4.
- [2] 양진영, 윤창우, 박성식, 최세완, 박래관, 장서건, “하이브리드 자동차 고전압 배터리 충, 방전을 위한 49kW급 고효율 양방향 DC/DC 컨버터 설계”, 2007년도 추계학술대회 논문집, pp 21-23, 2007. 11.