

# 리튬 배터리 충방전 특성을 고려한 양방향 DC/DC 컨버터 설계

임재관\*, 임덕영\*, 최재호\*, 권경민\*\*, 정교범\*\*\*  
 충북대학교\*, 우진산업\*\*, 홍익대학교\*\*\*

## Design of Bidirectional DC-DC converter for Lithium Battery Charging/Discharging Characteristics

Jaekwan Im\*, Deokyoung Lim\*, Jaeho Choi\*, Kyoung-min Kwon\*\*, Gyo-Bum Chung\*\*\*  
 Chungbuk National University\*, WooJin industrial system\*\*, Hongik University\*\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 에너지 저장장치로 각광받는 Li 배터리를 이용한 양방향 DC-DC컨버터의 구성 및 빠른 동특성을 갖는 이중 루프 PI제어기 설계를 제시하였다. 제어기는 초기 충전을 위한 정전류 제어기와 초기 충전 이후에 동작을 개시하는 전력제어기를 구성하였다. 배터리 모델링 및 양방향 DC-DC 컨버터용 제어기는 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며, 그 타당성을 실험을 통하여 확인하였다.

### 1. 서론

리튬 배터리는 높은 에너지 밀도와 긴 수명을 가지고 있기 때문에 휴대기기, 전기자동차 등과 같은 곳에 사용이 증가하는 추세이다. 일반적으로 이러한 배터리는 물리 기반의 자세한 모델이 있지만, 본 논문에서는 배터리의 전기화학적 동적 특성은 1개의 전압원과 캐패시터/저항의 조합으로 전기적 등가모델로 나타냈다. 배터리 파라미터는 전기화학적 상태로 결정되며, 배터리에 인가되는 전류의 크기(C-rate), SOC 및 온도에 크게 의존하여 변동된다.<sup>[1]</sup>

이러한 특성을 가진 배터리는 최근 이슈가 되고 있는 하이브리드 자동차 및 스마트그리드와 관련하여 에너지 저장장치로서 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 배터리의 충방전 특성을 고려하여 입력 전원부를 구성하였고 과도 상태에서 배터리의 응답특성을 개선하기 위하여 뒷단에 슈퍼캐패시터를 사용한 양방향 DC-DC 컨버터를 구성하였다. 구성된 컨버터는 빠른 동특성을 갖는 PI제어기를 설계하였다. 설계한 특성 확인은 PSIM을 이용한 시뮬레이션 및 실험을 수행함으로써 제시하는 제어기 설계의 타당성을 검증 및 확인하였다.

### 2. 배터리 및 슈퍼캐패시터 모델링

#### 2.1 배터리 모델링

배터리의 전기화학적 동적 특성을 비교하기 위하여 등가 회로를 그림 1(a)와 같이 나타내었다. 등가 회로는 배터리 내부저항  $R_s$ 와 분극 현상을 나타내는 충방전 전류에 의한 손실저항  $R_1, R_2$  및 이중층의 캐패시턴스  $C_1, C_2$ 로 구성된다. 배터리 개회로 전압(open circuit voltage)  $V_{ocv}$ 는 무부하 정상상태에서의 배터리 단자 전압이며, 배터리내 잔존 에너지 용량 SOC는 비선형 함수로 표현된다. 선형 영역에서  $R_s$ 의 값을 구하기 위하여 사용된 식은 다음과 같다.

$$V_{R_s} = V_{R_2} - V_{R_1} \quad (1a)$$

$$R = \frac{V_{R_s}}{I} \quad (1b)$$

구여어진 선형의 영역은 1초 정도의 매우 짧은 시간이지만, 배터리의 자기 방전 및 자기 충전에 대한 특성과 초기 전달함수에 큰 영향을 가진다.

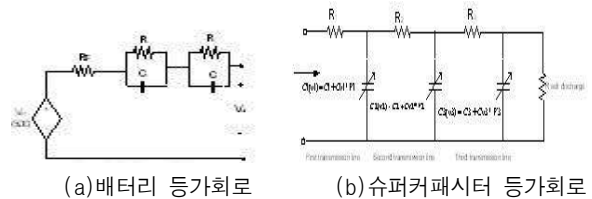


그림 1 배터리와 슈퍼캐패시터 등가회로  
 Fig. 1 equivalent circuit for Battery and Supercapacitor

#### 2.2 슈퍼캐패시터 모델링<sup>[2]</sup>

슈퍼캐패시터는 서로 다른 시정수를 가지는 RC전송라인으로 선형화 하였을 때 3개의 전송라인으로 모델링되고 그 때의 등가 모델은 그림 1(b)와 같이 구성할 수 있다. 그림 1(b)에서 각 전송라인의 캐패시터는 전압 의존성을 반영하기 위해서 고정 캐패시터( $C$ )와 전압상승에 따라서 비선형적으로 증가하는 전압 증속 캐패시터( $C_v$ )로 모델링되어지며, 후단의 자기 방전의 특성을 가지는 병렬 저항으로 구성된다.

### 3. 양방향 DC-DC컨버터 제어기

에너지 저장장치 구동을 위한 양방향 DC-DC컨버터는 그림 2에서 보는 것과 같이 구성된다. DC링크단의 배터리가 주 전원으로 사용되고 응답속도가 빠른 슈퍼캐패시터를 컨버터의 후단에 결선함으로써 DC링크단의 전압이 감소하면 슈퍼캐패시터에서 먼저 공급하고 또한 DC링크단에 전원이 상승하게 하면 슈퍼캐패시터에서 이를 충전함으로써 DC링크단의 전압을 안정화를 가져온다.

#### 3.1 양방향 DC-DC 컨버터의 제어기 설계<sup>[3]</sup>

에너지 저장장치 구동을 위한 양방향 DC-DC컨버터의 제어기는 그림 4에서 보는 것과 같이 초기 슈퍼캐패시터의 정전류 충전을 위한 전류제어기와 초기충전 이후에 개시하는 전력 제어기로 구성을 하였다.

초기충전 시에는 그림 4(a)에서 보는 것과 같이 정전류로 충전하기 위한 PI전류제어기와 완전 방전된 슈퍼캐패시터의 초기 돌입전류에 의한 제어기의 포화를 방지하기 위한 소프트

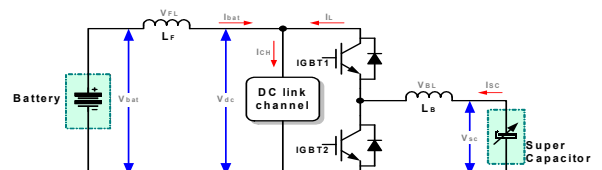
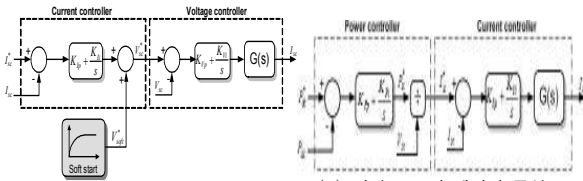


그림 3 양방향 DC-DC 컨버터 구성도  
 Fig. 3 Structure of bidirectional DC-DC converter



(a) 초기충전모드 시 제어기 구성도 (b) 전력모드 시 제어기 구성도

그림 4 컨버터의 모드에 따른 제어 블록도

Fig. 4 Control block diagram following mode of converter  
스타트 제어기로 구성되며, 시스템 전달함수  $G(s)$ 는 식(2)와 같다.

$$G(s) = \frac{I_{sc}(s)}{V_{BL}(s)} = \frac{1}{sL_{BL}} \quad (2)$$

계산된 시스템 전달함수로부터 폐루프 전달함수  $H(s)$ 를 계산하면 식(3)과 같이 유도되어진다.

$$H(s) = \frac{PI_{cc}(s)G(s)}{1+PI_{cc}(s)G(s)} = \frac{K_{fp}s + K_{fi}}{L_{BL}s^2 + K_{fp}s + K_{fi}} \quad (3)$$

2차 계통의 폐루프 전달함수인 식(3)과 2차 원형계통의 전달함수로부터 전류제어기의 이득을 계산하면 식(4)와 같이 계산되어진다.

$$\begin{cases} K_{fp} = 2\xi\omega_n L_{BL} \\ K_{fi} = \omega_n^2 L_{BL} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $\xi$ 는 2차 원형계통의 댐핑계수로 0.707로 설정하였고  $\omega_n$ 은 전류제어기의 절점주파수로 내부루프인 전압제어기를 고려하여 100[Hz]로 선정하였다.

내부루프인 전압제어기에 있어서 시스템 전달함수  $G(s)$ 는 슈퍼캐패시터로 흐르는 전류 방정식으로부터 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$G(s) = \frac{V_{sc}(s)}{I_{sc}(s)} = \frac{1}{sC_{sc}} \quad (5)$$

계산된 시스템 전달함수로부터 폐루프 전달함수  $H(s)$ 를 계산하면 식(6)과 같이 유도되어진다.

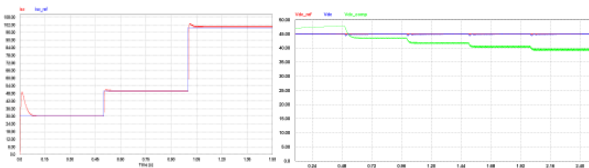
$$H(s) = \frac{PI_{vc}(s)G(s)}{1+PI_{vc}(s)G(s)} = \frac{K_{vp}s + K_{vi}}{C_{sc}s^2 + K_{vp}s + K_{vi}} \quad (6)$$

전압제어기의 이득선정도 전류제어기와 같은 방법으로 2차 원형계통의 전달함수로부터 계산할 수 있다.

본 논문에서는 외부루프인 전류제어기의 응답속도와 스위칭 주파수를 고려하여 절점주파수를 1[kHz]로 선정하였다.

전력모드 시 내부 루프인 전류제어기는 식(2)~식(4)와 동일한 전달함수로 계산되어지고 이때에는 초기충전모드 일 때와 달리 내부루프에 위치하게 되어 외부루프인 전력제어기의 절점주파수보다 빠른 절점주파수를 가지게 되며 이때 전력모드에서의 전류제어기의 절점주파수는 500[Hz]로 선정하였다.

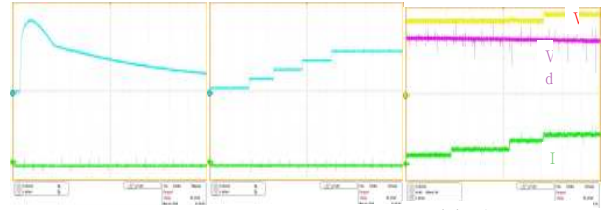
또한 전력모드에서 외부루프인 전력제어기는 DC링크단의 전력을 제어하는 것으로 DC링크단의 인피던스는 추종값과 실제값이 항상 같게 됨으로 결국  $V_{dc}^2$ 에 의한 어려움을 보상하는 결과와 동일하게 계산되어진다. 전력제어기에 있어서 시스템 전달함수  $G(s)$ 는 식(7)의 관계에 의해 식(8)와 같이 전압



(a) 전류 추종값 변경시 전류제어기의 응답 결과 (30/50/100A7번) (b) 전력제어기의 유무에 따른 DC링크전압

그림 5 초기충전모드와 전력모드 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulation results for initial charging and power mode



(a) 소프트스타트 제어 실험파형 (b) 전류제어기의 응답 실험 결과 (c) 전력모드의 실험결과

그림 5 초기충전모드와 전력모드 실험 결과

Fig. 5 Experiment results for initial charging and power mode  
제어기의 시스템 전달함수와 동일하게 계산되어진다.

$$P_{dc} \approx P_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 = V_{sc} I_{sc} \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{P_{dc}(s)}{I_{sc}(s)} = V_{sc}(s) = \frac{1}{sC_{sc}} \quad (8)$$

외부루프인 전력제어기의 절점주파수는 내부루프의 1/10로 선정하여 내부루프인 전류제어기에 영향이 가지 않도록 구성하였다.

외부루프인 전력제어기의 절점주파수는 내부루프의 1/10로 선정하여 내부루프인 전류제어기에 영향이 가지 않도록 구성하였다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문의 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션은 PSIM을 이용하여 수행하였다. 시뮬레이션은 PSIM에서 제공되는 DLL을 사용하여 제어부를 구성하였고 제어부로 들어오는 모든 신호는 200 [ $\mu$ s]로 샘플링하였으며, 제한한 모든 제어기는 Tustin's 변환을 적용하여 디지털 PI제어기로 구성하였다.

초기충전모드시 시뮬레이션은 0.1[s]동안 소프트스타트를 수행하고 30/50/100A로 변화하여 정전류 충전을 수행함으로써 소프트스타트기법과 정전류 제어기의 동작특성을 확인하였다.

전력모드시 시뮬레이션은 배터리 전원을 45[V]로하고 0.5[s] 동안 DC링크 전압을 48[V]로 상승하고 20/10/6.7/5 $\Omega$ 로 DC링크 부하를 증가하였을 경우에 대해 전력제어기의 응답 특성을 확인하였다. 그림 6(a), (b), (c)는 실험에서 시뮬레이션과 유사한 결과를 나타냄을 보여준다.

### 4. 결론

본 논문에서는 배터리 충방전 특성을 고려한 양방향 DC-DC 컨버터를 구성하였고 구성된 컨버터는 초기충전모드와 전력모드로 나누어 초기충전모드에서는 정전류로 충전할 수 있도록 PI제어기의 이득을 선정하였고 초기 돌입전류를 방지하기 위한 소프트스타트기법을 제안하였다. 전력모드 시에는 DC링크단의 전압을 평활하게 유지하기 위한 PI전력제어기를 제안하였다. 제안된 알고리즘의 검증을 위한 시뮬레이션은 PSIM을 통하여 수행하였고, 실험을 통하여 수행결과가 시뮬레이션과 동일하게 동작함을 확인하였다.

"본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음"  
(NIPA-2009-(C1090-0904-0007))

### 참고 문헌

- [1] Stephan Buller, "Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batteries for Power Electronic Applications," IEEE Transactions on industry application, Vol. 41, No.3, pp. 742-747, 2005
- [2] 노세진, 이진목, 이재문, 최재호, "PSIM을 이용한 슈퍼캐패시터의 전기적 모델링," 전력전자학술대회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 160-162, 2007.
- [3] 정상민, 조진상, 최세완, 한수빈, "하이브리드 에너지 시스템에서 양방향 DC-DC 컨버터에 의한 축전지 제어 기법," 전력전자학술대회 논문집, pp. 359-363, 2004.