

# 대용량 병렬 양방향 컨버터를 이용한 배터리 충·방전기 해석

최재동, 안재황\*, 성세진\*  
한국항공우주연구원, 충남대학교\*

## An Analysis of Battery Charger · Dischrger using Parallel Connected Bi-directional Converter

Jae-dong Choi, Jae-whang Ahn\*, Se-jin Seong\*  
Korea Aerospace Research Institute, Chungnam National University\*

### ABSTRACT

The battery charger of spacecraft has two different modes of operation respectively. One is the bus voltage regulation mode and the other is the charge current regulation mode. And also the battery discharger provide the power during eclipse mode of spacecraft.

In this study, a test model of the battery charger and discharger using bi-directional converter are designed and analyzed. These Battery Charger and Discharger is introduced the modular converter method that can be added the converter modules according to the load variation.

### 1. 서 론

위성의 전력계 서브시스템은 태양전지, 전압조절기(Solar Array Regulator), 배터리 충방전기, 배터리로 구성되어있다. 태양전지는 인공위성의 전력생성원이며 전압조절기는 태양전지로부터 발생하는 전력을 조절하여 버스에 공급하는 역할을 한다. 또한 배터리와 배터리 충방전기는 낮기간 동안 태양전지로부터 전력을 공급받아 배터리에 저장하며, 식기간 동안에는 배터리로부터 부하에 전력을 공급한다. 위성의 전력계 서브시스템에서 태양전지와 배터리의 정상동작여부는 위성의 수명과 직접적인 관계를 갖고 있으며 이들의 안정적인 임무수행이 요구된다<sup>[1]</sup>.

최근 부하용량의 증가로 인해 위성 용량이 점차 증가되면서 위성체내부의 열, 부피 및 무게가 새로운 문제로 대두되고있다. 이와 더불어 배터리 충방전기의 제어방식 또한 보다 간단하면서도 부피와 무게를 줄일 수 있는 방안을 모색하고있는 실정이다<sup>[2, 4]</sup>. 따라서 본 연구에서는 대용량 배터리 충/방전을 위해 설계된 모듈형태의 병렬구조를 갖는 양방향 컨버터가 제안되었다<sup>[5]</sup>. 이와같은 병렬구조의

양방향 배터리 충·방전기는 이전의 충전을 위한 벡-컨버터와 방전을 위한 부스트-컨버터 각각을 설계하는 것보다 양방향 컨버터를 병렬로 사용함으로써 필요한 개수만큼의 컨버터가 사용되어 전류분배를 효율적으로 할 수 있게 된다. 예를 들면, 충전시 부하에서 요구되는 전력량만큼 컨버터의 일부 혹은 전부를 사용할 수 있는 개념으로 부하용량에 따라 N개의 양방향 컨버터가 사용 가능하다는 것이다. 또한 각 모듈의 입·출력 전류가 1/N로 줄어들 수 있어 같은 용량의 배터리 충·방전기 설계시 보다 적은 부피의 컨버터로 대체가 가능하다. 따라서 본 연구에서 제안된 배터리 충·방전기는 단일 컨버터에 대한 충·방전 모드가 해석되었으며 또한 방전시 두 개의 컨버터를 병렬 사용시의 소신호 해석이 이루어졌다. 또한 버스전압으로부터 귀환되는 필터회로 및 배터리 충·방전기의 보상회로가 해석되었다. 이와 같은 병렬컨버터 모듈은 탑재프로세서를 통해 배터리 충·방전 상태를 모니터링하고 제어 소프트웨어를 통해 항상 최적의 배터리 충·방전 상태가 유지가 되도록 설계되어졌다.

### 2. 배터리 충·방전모드해석

본 연구에서 사용된 양방향 배터리 충·방전기(BPC)는 그림1에서 보여지는 것과 같은 양방향 전력 스위칭 토폴로지를 사용한다. 배터리 충·방전기의 주 회로는 기존의 벡 컨버터와 부스트 컨버터를 하나의 컨버터 내에서 동작하도록 구성하였다. 배터리 충전시 스위치  $S_{1A}$ 을 온·오프시켜 동작하며, 배터리 방전시 스위치  $S_{1B}$ 를 온·오프하여 동작한다. 스위치  $S_{1A}$ 과  $S_{1B}$ 의 전류 방향성은 버스전압의 변동에 따라 달라진다. 또한 BPC동작은 충전연속도통모드, 방전연속도통모드 및 방전불연속/연속도통모드로 구성된다. 이것은 전류레벨과 방향의 함수로서 BPC전류모드의 본질은 양방향 컨버터의

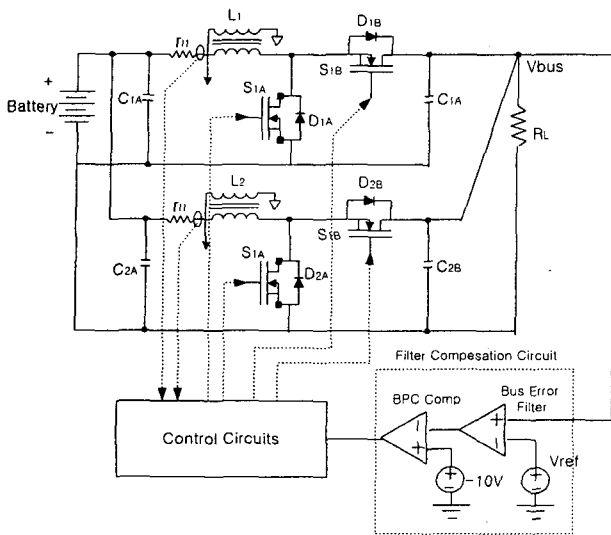


그림 1 배터리 충·방전기 제어회로도  
Fig. 1 Control Circuit of Battery Charger/Discharger

토폴로지로 설명되어질 수 있다.

컨버터에서 충전기의 스위치와 방전기의 스위치는 서로 반대로서 충전기(Buck)스위치가 enable되면 방전기(Boost)스위치는 disable된다. 만약 충전기 스위치가 enable되면 인덕터는 전류레벨과 방향에 관계없이 연속도통모드이다. 따라서 충전기 스위치가 배터리로 충전전류를 제공할 수 있게 된다. 만약 충전기 스위치가 disable되고 방전모드 스위치가 enable되면 인덕터는 배터리 전압에 따라 1.2A에서 1.8A이하일 때 BPC전류레벨들에 대해 불연속 도통모드가 된다. 이러한 배터리 충·방전기는 디지털 제어방식을 갖는 탑재컴퓨터로부터 보내지는 충·방전 스위치 명령에 의해 충전비가 결정된다. 또한 컨버터는 충전시 벡-컨버터가 되어 버스전압을 배터리 전압으로 다운시켜 충전하게 되며, 방전시 부스트-컨버터로 동작되며 배터리의 전압을 버스로 보내 식기간 동안 전력을 공급하게 된다.

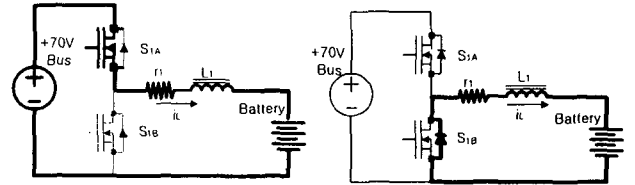
## 2.1 배터리 충·방전기 기본모드해석

배터리 충전기의 동작원리는 그림 2의 벡 컨버터와 같다. 스위치  $S_1$ 이 닫혀  $t_1$ 의 시간동안 도통(On)할 때, 버스 입력전압  $V_i$ 는 부하양단에 나타난다. 그리고 스위치  $S_1$ 이  $t_2$ 의 시간동안 차단(Off)될 때 부하양단의 전압은 0이 된다.

### 2.1.1 충전모드 해석

그림 2에서 인덕터 L과 배터리의 커패시터 성분 C가 이상적으로 매우 크면 정상상태에서 인덕터 L에는 일정한 전류가 흐르고 커패시터 C의 양단에는 일정한 전압이 걸리게 된다. 그러나 실제의

경우 인덕터 전류  $i_L$ 이나 커패시터 전압  $v_0$ 에 리플 성분이 포함된다. 배터리 충전기 모드로 이용되는 벡 컨버터의 스위치  $S_1$ 의 동작에 따른 등가회로는 그림 2와 같다.



(a)스위치 도통구간 ( $0 \leq t < t_{on}$ ) (b)스위치 차단구간 ( $t_{on} \leq t < T$ )  
그림 2 배터리 충전기 스위치 모드  
Fig. 2 Switch Mode of Battery Charger

### 1) 전류 상승 구간 ( $0 \leq t < t_{on}$ )

스위칭 주기 T에 대하여 스위치  $S_1$ 이 도통되는 동안 컨버터의 등가회로는 그림 2a와 같으며, 이때 인덕터에 흐르는 전류  $i_L$ 의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - v_0}{L} \quad (1)$$

$$i_{L(t)} = \frac{1}{L} \int_0^t (V_i - v_0) dt + I_{min} \quad (2)$$

$$I_{max} = i_L(t_{on}) = \frac{1}{L} \int_0^{t_{on}} (V_i - v_0) dt + I_{min} \quad (3)$$

여기서 출력전압  $v_0$ 의 리플성분이 L, C 저역 통과 필터회로에 의해 대부분 제거되므로 출력전압은 일정한 직류전압  $V_0$ 가 된다.

### 2) 전류 하강 구간 ( $t_{on} \leq t < T$ )

그림 2b의 스위치 차단구간의 인덕터에 흐르는 전류  $i_L$ 의 기울기는 다음과 같다.

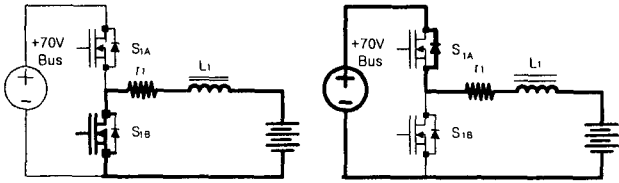
$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_0}{L} \quad (4)$$

$$i_{L(t)} = \frac{1}{L} \int_{t_{on}}^t (-v_0) dt + I_{min} \quad (5)$$

$$I_{min} = i_L(t = T) = \frac{1}{L} \int_{t_{on}}^T (-v_0) dt + I_{max} \quad (6)$$

### 2.1.2 방전모드해석

배터리 방전기의 동작원리는 벡-컨버터와 유사한 원리로 스위치의 도통과 차단에 의해 배터리 전압을 스텝-업시켜 버스로 전압을 공급한다. 그림 3은 배터리 방전기로 사용된 부스트-컨버터의 등가회로도이다. 기본적인 스위칭 동작원리는 배터리 충전기와 유사하다.



(a)스위치 도통구간(  $0 \leq t < t_{on}$  ) (b)스위치 차단구간(  $t_{on} \leq t < T$  )  
 그림 3 배터리 방전기 스위치 모드  
 Fig. 3 Switch Mode of Battery Discharger

## 2.2 병렬 연결된 배터리 충·방전기 해석

그림4는 두 개의 컨버터 병렬연결 시 제어 전달 함수이다. 인덕터 전류들  $I_{L1}$ 과 출력전압이 벅-스위치 혹은 부스트-스위치의 도통비를 조절하고 컨버터의 출력전압을 조절하기 위해 귀환되어진다. 이때 병렬 접속된 컨버터의 제어루프의 블록다이어그램은 다음과 같다.

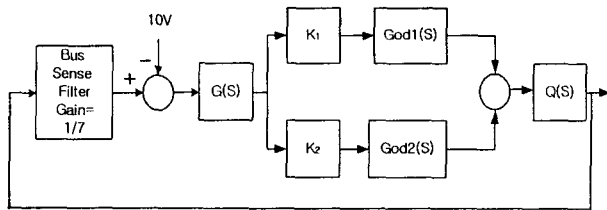


그림 4 배터리 충·방전기 제어루프의 블록다이어그램  
 Fig.4 Block Diagram of Battery Charger/Discharger under Control

여기서

$K$  = 컨버터  $i$ 의 PWM이득

$God_i$  = 컨버터 전류  $i$ 의 전달함수

$G(S)$  = 보상회로의 전달함수

$Q(S)$  = 출력임피던스 함수

$$G_{od1} = \frac{i_{L1}(s)}{D(s)} = \frac{(2sC + \frac{1}{R_L})(sL + r_L)}{(sL + r_n) + ((2sC + \frac{1}{R_L})(sL + r_n) + 1) + (sL + r_L)} \cdot V_{bat} \quad (7)$$

$$G_{od2} = \frac{i_{L2}(s)}{D(s)} = \frac{(2sC + \frac{1}{R_L})(sL + r_n)}{(sL + r_n) + ((2sC + \frac{1}{R_L})(sL + r_n) + 1) + (sL + r_n)} \cdot V_{bat} \quad (8)$$

## 3. 필터 보상회로

배터리 충·방전기의 제어를 위해 위상여유를 위한 보상회로가 필요하다. 실제로 충전기의 입력과 출력이 모두 일정 전압원이므로 충전전류가 제어되지 않으면 충전기는 불안정해지기 쉬우므로 버스로

부터 검출된 전압을 필터회로 및 배터리 충방전기 보상회로를 통해 보다 안정된 위상여유와 이득을 얻을수 있게된다.

그림 5와 7은 버스오차 및 BPC보상회로이다. 그림 6은 버스전압으로부터 검출된 전압과 필터회로를 통해 보상된 주파수 응답특성을 보여주고 있다. 그림 8은 BPC만의 위상여유와 이득을 보여 주고있다.

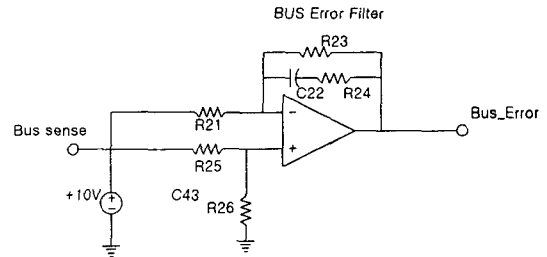


그림 5 버스 오차 보상회로  
 Fig. 5 Compensated Circuit of Bus Error

버스전압으로부터 검출된 버스오차회로의 전달함수는 식 (9)와 같다.

$$G_1 = \frac{R_{23}}{R_{21}} \frac{1 + C_{22} \cdot R_{24} \cdot S}{1 + C_{22} \cdot (R_{23} + R_{24}) \cdot S} \quad (9)$$

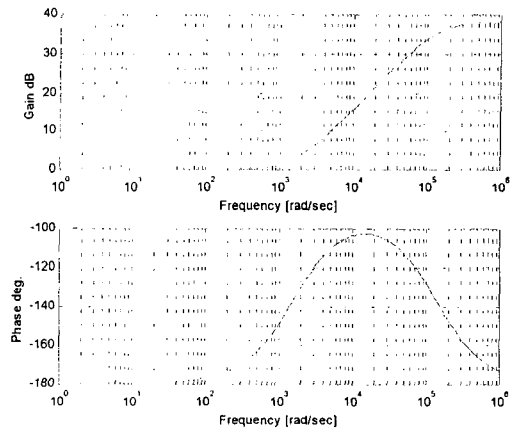


그림 6 버스 오차 보상회로  
 Fig. 6 Compensated Circuit of Bus Error

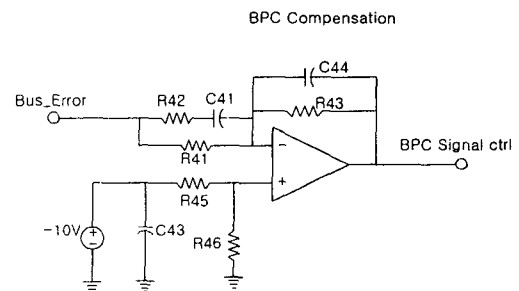


그림 7 배터리 충·방전기 보상회로  
 Fig. 7 Compensated Circuit for battery charger discharger

배터리 충·방전기를 위한 보상기의 전달함수는 식

(10)와 같다.

$$G_2 = \frac{-R_{43}}{R_{41}} \frac{1 + C_{41} \cdot (R_{41} + R_{42})S}{1 + C_{41} \cdot R_{42} \cdot S} \quad (10)$$

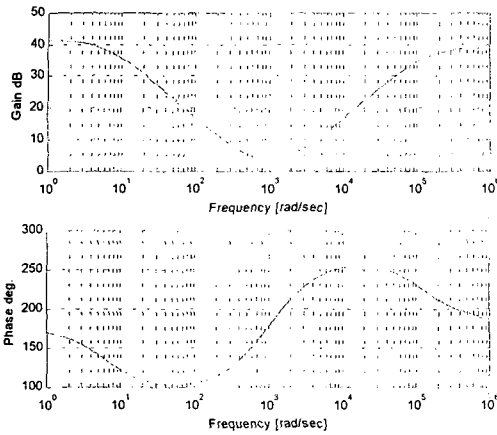


그림 8 배터리 충·방전기 보상회로  
Fig. 8 Compensated Circuit for battery charger discharger

#### 4. 실험 결과

그림 9는 배터리 충전기의 실험결과 파형으로서 주 스위치의 온/오프 동작을 보여주고 있다. 이때의 스위칭 주파수는 100KHz이며, 68V의 버스 입력전압 및 시비율 (Duty Ratio) 0.47을 갖도록 제어함으로써 32V의 배터리 충전전압을 얻게 된다. 그림 10은 배터리 충전기의 입·출력 전압으로서 입력전압이 68V일 때 출력전압이 32V가 된다. 이 결과는 시비율 0.47에 의한 결과로서 출력전압은 이 듀티비를 조절함으로써 변경 가능하도록 설계되어졌다. 그림 11은 배터리 충·방전기가 식기간 동안 방전기로서 동작할 때를 가정한 실험결과이다. 그림 12는 배터리 방전시 배터리의 입·출력 전압을 보여주고 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 양방향컨버터를 이용한 배터리 충방전기가 제안되어졌다. 제안된 병렬 양방향 컨버터의 단일컨버터 사용시 충·방전에 대한 기본 동작모드가 분석되었으며, 두 개의 병렬컨버터 동시 사용시 각 컨버터에서의 전류분배에 대한 전달함수가 분석되었다. 또한 설계시 필터회로 및 배터리 충·방전기의 보상회로의 응답특성이 분석되어졌다.

#### 참 고 문 헌

[1] G.W.Fleck, "Solar Array Switching Unit Stability Analysis", Inter-Society Energy Conversion Engineering Conference, pp. 576~581, 1984.

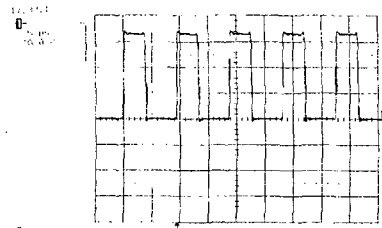


그림 9 배터리 충전기의 스위칭파형  
Fig. 9 Switching waveform of BCR

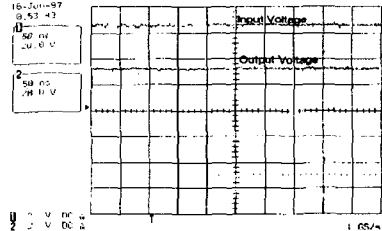


그림 10 배터리 충전시 입출력파형  
Fig. 10 Input-output waveform of BCR

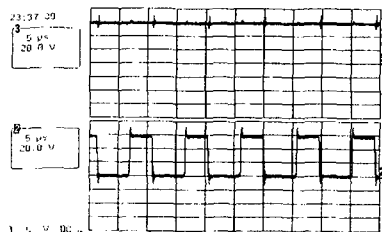


그림 11 배터리 방전기의 스위칭파형  
Fig. 11 Switching waveform of discharger

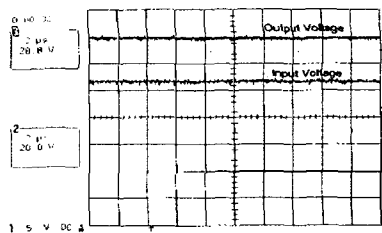


그림 12 배터리 충전시 입출력파형  
Fig. 12 Input-output waveform of discharger

[2] JAMES J. LOCASCIO and WILLIAM CHO, "A New PWM Controller IC for Battery Powered System", HPFC proc. pp81-93, 1993  
[3] P.Perol, E. Navarro Anton, "A Novel High Efficiency Low Mass Battery Discharge Regulator for Minisatellite ", European Space Power Conf. Vol. 1, pp 33-39, 1995  
[4] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, Inc., 1989.  
[5] J. D. Choi, et al., "Design and Analysis of a Battery Charge/Discharge Regulator of Satellite", The international Conference on Electrical Engineering, Vol. 2, 1998, pp.935-938