

# 탑재형 배터리 충전기의 안정도 향상을 위한 제어기 설계

고영종, 정해광, 이교범  
아주대학교

## Controller Design for Stability Improvement of an On-Board Battery Charger

Young-Jong Ko, Hae-Gwang Jeong, and Kyo-Beum Lee  
Ajou University

### 초 록

본 논문은 탑재형 배터리 충전기의 안정도 향상을 위한 제어기 설계 기법을 제안한다. 전체 시스템은 역률개선회로와 위상천이방식의 풀-브릿지 컨버터로 구성되어 있다. 역률개선회로는 전류제어기와 전압제어기에 의해 입력전류와 직류단 전압을 제어하며, 풀-브릿지 컨버터는 직류단 전압을 입력으로 하여 일정 출력전압을 제어한다. 본 논문에서는 역률개선회로의 소신호 모델을 이용한 PI 전류 및 전압제어기 설계기법, 위상천이방식의 풀-브릿지 컨버터에서 출력 캐패시터의 작은 등가직렬저항(ESR)을 고려한 타입-3 형태의 제어기 설계기법을 제안한다. 3kW급 탑재형 배터리 충전기 시스템을 모의한 시뮬레이션을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

최근 원자력 에너지와 화석연료의 환경오염 문제가 화두 되고 있으며 교토 의정서가 발효됨에 따라 오염물질에 대한 감축이 선택이 아닌 의무가 되었다. 기존의 원자력, 화석에너지 사용량을 줄이기 위해 대체 에너지 원을 이용하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 이에 따라 자동차 산업도 기존의 내연기관 자동차에서 친환경 자동차 개발에 적극적으로 나서고 있다.<sup>[1]</sup> 친환경 자동차는 기존의 내연기관을 전기모터, 연료탱크는 배터리, 주유구는 충전기로 대체된 형태의 자동차이다. 친환경 자동차는 순수 전기자동차, 내연기관과 배터리를 혼합하여 사용하는 하이브리드 자동차, 상용전원을 이용하여 배터리를 충전하는 플러그인 하이브리드 자동차로 구분된다. 특히 플러그인 하이브리드 자동차는 상용전원을 이용하여 배터리를 충전하기 때문에 계통과의 효율적인 측면과 고조파 문제를 해결해야 한다. 이를 위해 벽 컨버터, 부스트 컨버터, 벽-부스트 컨버터 등의 역률개선회로를 사용하며, 충전기 고장 시 시스템 보호를 위하여 절연형 DC-DC컨버터를 사용한다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 역률개선회로와 풀-브릿지 컨버터로 구성된 탑재형 배터리 충전기의 안정성 향상을 위한 제어기 설계 기법을 제안한다. 역률개선회로는 역률특성이 우수한 부스트 컨버터를 사용하며, 이의 소신호 모델을 이용한 PI 전류 및 전압제어기를 설계한다. 또한 위상천이 방식의 풀-브릿지 컨버터의 과도응답과 안정성 향상을 위한 타입-3형태의 제어기를 제안하고 설계한다. 3kW급 시스템을 모의한 시뮬레이션을 통해 제안한 제어기의 성능을 검증한다.

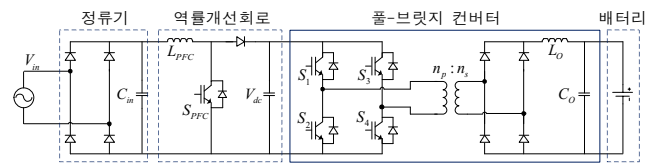


그림 1 탑재형 배터리 충전기 시스템  
Fig. 1 An on-board battery charger system

### 2. 본 문

탑재형 배터리 충전기는 정류기, 역률개선회로, 풀-브릿지 컨버터로 구성되어 있으며 이는 그림 1과 같다. 역률개선회로는 입력전류의 역률개선과 직류단 전압( $V_{dc}$ )제어를 수행하고, 풀-브릿지 컨버터는 일정 출력전압제어를 수행한다.

#### 2.1 역률개선회로

역률개선회로는 그림 2와 같이 직류단 전압제어를 위한 전압제어기가 상위제어기가 되고, 전압제어기로부터 출력된 전류지령에 따라 전류제어기가 입력 전류를 제어한다.

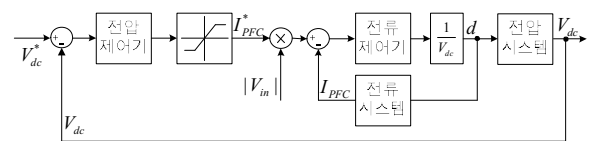


그림 2 역률개선회로의 제어 블록도  
Fig. 2 Control block diagram of a power factor correction

#### 2.1.1 전류 제어기 설계

전류 시스템의 전달함수는 식 (1)과 같이 전류-통류율로 나타낸다.

$$G_{id}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{(V_{dc}/L_{PFC})s}{s^2 + 1/L_{PFC}C_{dc}} \quad (1)$$

여기서  $L_{PFC}$ 는 역률개선회로의 인덕턴스,  $C_{dc}$ 는 직류단 캐패시턴스이다.

그림 3은 전류 시스템 전달함수를 이용하여 설계된 제어기의 보드선도이다. 차단 주파수는 10[kHz]로 선정하였고  $-70^\circ$ 의 충분한 위상여유를 갖는다.

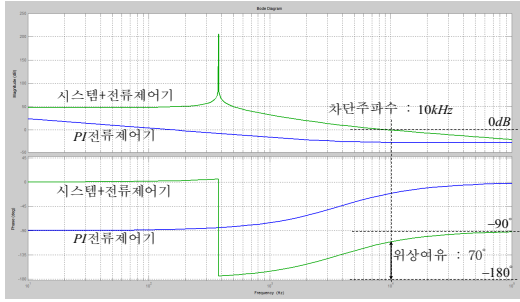


그림 3 전류제어기의 보드선도  
Fig. 3 Bode plot of a current controller

### 2.1.2 전압 제어기 설계

직류단 전압-캐패시터 전류에 대한 전달함수와 PI 전압제어기 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$G(s) = \frac{V_{dc}}{I_c} = \frac{1}{sC_{dc}}, \quad C_v(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

피드백 전달함수의 특성다항식은 식 (3)과 같고, 극배치 방식을 통해 계산된 PI 전압제어기 게인은 식 (4)와 같다.

$$s^2 + s\frac{K_p}{C} + \frac{K_i}{C} = s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2 \quad (3)$$

$$K_p = 2C_{dc}\zeta\omega_0, \quad K_i = C_{dc}\omega_0^2 \quad (4)$$

여기서  $\zeta$ 는 감쇠비이고  $\omega_0$ 는 제어기 차단주파수이다.

### 2.2 풀-브릿지 컨버터

풀-브릿지 컨버터의 평균 전압을 통한 등가회로는 LC회로와 같이 간략화 된다. LC회로에서 캐패시터의 등가직렬저항(ESR)이 작다면 차단주파수 이후에 -20dB의 기울기를 갖기 때문에 타입-2의 제어기로는 충분한 과도응답특성과 안정성 확보가 불가능하다.

본 장에서는 제어기의 과도응답특성과 안정성 향상을 위해 타입-3 형태의 제어기 설계한다. 그림 4는 설계된 시스템의 보드선도이며, 제어기 차단주파수 5[kHz]로 선정하였고  $-60^\circ$ 의 위상여유를 갖는다.

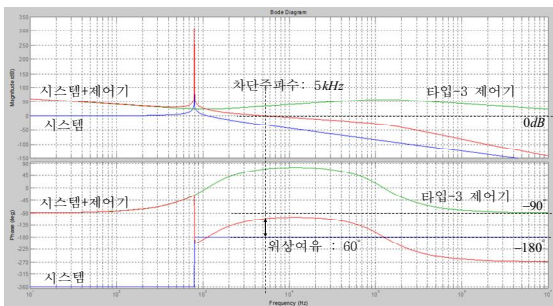


그림 4 타입-3 형태의 제어기 보드선도  
Fig. 4 Bode plot of a type-3 controller

### 3. 시뮬레이션

설계된 제어기는 3kW급 시스템에 적용되었고 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 그림 5는 직류단 전압과 인덕터 전류, 입력전압, 입력전류이다. 직류단 전압은 370[V]로 제어되며 기존

의 정류기 회로 대비 입력전류의 역률이 향상되었다. 그림 6은 출력전압과 출력 인덕터 전류, 출력전류이다. 출력전압은 200[V], 370[V], 270[V]로 제어되며 과도응답특성 향상과 정상상태 오차가 감소하였다.

표 1 시스템 파라미터  
Table 1 System parameters

$C_{in}$	$L_{PFC}$	$C_{dc}$	변압기
4 $\mu$ F	270 $\mu$ H	660 $\mu$ F	16:20
$L_O$	$C_O$	$f_{sw}$	제어주기
400 $\mu$ H	100 $\mu$ F	100kHz	100kHz

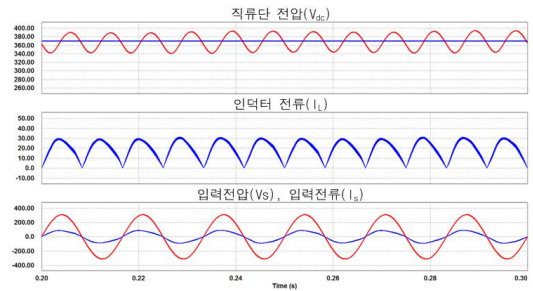


그림 5 역률개선회로의 시뮬레이션 파형  
Fig. 5 Simulation waveform of a power factor correction

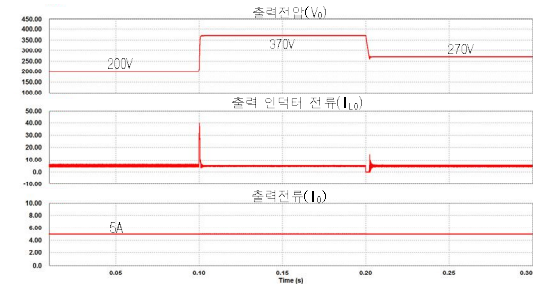


그림 6 풀-브릿지 컨버터의 시뮬레이션 파형  
Fig. 6 Simulation waveform of a full-bridge converter

### 4. 결론

탑재형 배터리 충전기의 안정성 향상을 위한 제어기 설계 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 역률개선회로의 소신호 모델을 이용하여 설계되었고 풀-브릿지 컨버터는 작은 등가직렬저항을 고려한 타입-3 형태의 제어기를 설계를 통해 과도응답특성과 안정성이 향상되었다.

### 참고 문헌

- [1] J. Gallardo-Lozano, M.I. Milanes-Montero, M.A. Guerrero-Martinez, and E. Romero-Cadaval, "Three-phase bidirectional battery charger for smart electric vehicles," CPE, pp. 371-376, June 2011.
- [2] Kim T. H, Lee S. J, Choi W, "Design and control of the phase shift full bridge converter for the on-board battery charger of the electric forklift," IEEE ICPE - ECCE, pp. 2709-2716, June 2011.