

# 배터리 충전기를 위한 위상천이 풀브리지 컨버터 설계

김태훈, 이승준, 이근홍, 최우진  
숭실대학교 전기공학부

## Design of the Phase Shift Full Bridge Converter for the Battery Charger

Tae-Hoon Kim, Seung-Joon Lee, Geun-Hong Lee, Woojin Choi  
Department of Electrical Engineering, Soongsil University

### ABSTRACT

본 논문에서는 전동지게차용 납축전지의 충전을 위해 위상천이 풀브리지 컨버터를 이용한 충전기의 설계 및 제작에 관하여 기술한다. 배터리는 저항부하와 달리 큰 커패시턴스 성분을 가지고 있어 컨버터의 리플 전류를 모두 흡수하게 되며, 이로 인해 시스템 효율 및 축전지 수명에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 2차측에 Current Doubler를 가진 위상천이 풀브리지 컨버터를 적용함으로써 변압기 전류 및 리플 전류의 크기를 감소시켰다. 또한, 배터리 임피던스를 고려한 제어기 설계 모델을 제시하고 제어기를 설계하여, 실제 배터리를 대상으로 한 정전류 및 정전압 제어를 통해 충전기 시스템의 성능 및 안정성을 검증하였다.

### 1. 서론

지게차는 동력원의 종류에 따라서 LPG엔진지게차, 디젤엔진지게차, 전동지게차 등으로 분류할 수 있으며, 디젤엔진지게차의 경우 내구성 및 토크가 뛰어나 산업 현장에서 선호해 왔으나 최근 들어 매연과 소음이 적고 무공해로 실내 환경에 적합한 전동지게차의 사용이 높아지고 있으며, 대형 물류센터나 음식 저장고 등 여러 사업 분야에서 해마다 인기가 높아지고 있다. 이러한 전동지게차의 동력원은 짧은 시간 내에 큰 전류를 방전할 수 있어야 하기 때문에 매우 큰 전류 정격을 가지는 납축전지가 사용되고 있다. 납축전지의 경우 무게가 무겁고 에너지 저장밀도가 높지 않은 단점이 있으나 지게차의 특성상 무게 중심을 유지하기 위해 납축전지가 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 전동지게차용 납축전지의 충전을 위해 위상천이 풀브리지 컨버터를 선정하여 배터리 충전기를 구성하였다. 또한, 변압기 2차측에는 Current Doubler 정류방식의 회로를 선정하여 변압기 및 다이오드의 전류 부담을 저감하였으며, 이를 통해 출력 전압 및 전류의 리플도 저감하였다. 3kW급 컨버터를 설계하여 제작하였고, 실험을 통해 성능을 검증하였다.

### 2. 컨버터 모델링 및 제어기 설계

#### 2.1 컨버터 모델링

그림 1은 배터리 충전 시스템의 전체 블록 다이어그램을 나타낸다. 상용전원으로부터 EMI 필터, 브리지 정류기, 부스트 PFC, DC-DC 컨버터로 구성된다. 이때 DC-DC 컨버터는 두 개의 인덕터 정류회로를 이용한 Current Doubler 타입의 풀브리지 컨버터이다. 이 회로의 장점은 변압기 2차측 전류 정격을 감소시킬 수 있으며, 이로 인해 손실이 적어지고, 출력 커패시

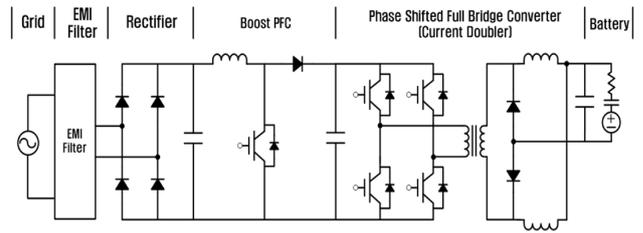


그림 1 전동지게차 충전기 시스템 블록 다이어그램

터의 유효 주파수가 스위칭 주파수의 두 배가 된다는 것이다. 따라서 배터리 충전기와 같은 대전류, 저전압 응용 분야에서 유용하게 사용될 수 있다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서 위상천이 풀브리지 컨버터의 소신호 분석을 위해 단순화된 PWM 스위치 모델을 이용하여 소신호 모델을 추출하였다. Current Doubler를 이용한 풀브리지 컨버터의 출력전류는 두 개의 필터 인덕터 전류의 합이 되기 때문에 등가회로는 두 개의 병렬로 연결된 벡 컨버터로 나타낼 수 있다. 또한, 출력 필터 인덕터 전류들은 개별적으로 제어되지 않기 때문에 컨버터의 소신호 모델 전달함수는 벡 컨버터의 평균전류 모드 제어 전달함수로 볼 수 있다. 비록 각각의 인덕터에 흐르는 전류의 평균값에는 다소 차이가 있을 수 있지만, 입력 측의 DC 차단 커패시터에 의해 변압기의 Flux Balancing이 유지되어 이들의 평균값을 같다고 가정할 수 있다. PWM 스위치 모델을 적용하고 변압기가 이상적이라고 한다면, 컨버터의 등가 소신호 모델은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이때 배터리 충전 시스템을 설계하기 위해서는 납축전지의 임피던스 모델을 등가화 할 필요가 있다. 여러 가지 납축전지의 등가 임피던스 모델이 존재하지만 본 논문에서는 그림 2와 같이 직렬 저항, 커패시터 그리고 등가 전압원으로 간단히 모델링 하였다.

먼저 제어 전달함수들을 간단히 표현하기 위해 출력 필터의 전달함수 및 입력 임피던스를 식 (1), (2)로 정의할 수 있다.

$$H_o(s) = \frac{s^2(R_b R_c C_b C_f) + s(R_b C_b + R_c C_f) + 1}{s^3(LR_c C_f + LR_b C_b C_f) + s^2(LC_b + LC_f + R_b R_c C_b C_f) + s(R_b C_b + R_c C_f) + 1} \quad (1)$$

$$Z_f(s) = \frac{s^3(LR_c C_f + LR_b C_b C_f) + s^2(LC_b + LC_f + R_b R_c C_b C_f) + s(R_b C_b + R_c C_f) + 1}{s^2(R_b R_c C_b C_f) + s(R_b C_b + R_c C_f) + 1} \quad (2)$$

따라서 출력 필터 인덕터 전류 제어 전달함수  $G_{id}$ 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 출력전압 제어 전달함수  $G_{vd}$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$G_{id}(s) = \hat{i}_L(s) / \hat{d}(s) = nV_{in} / Z_f \quad (3)$$

$$G_{vd}(s) = \hat{v}_o(s) / \hat{d}(s) = H_o n V_{in} \quad (4)$$

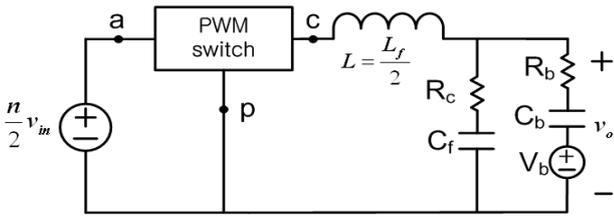


그림 2 컨버터의 소신호 모델 등가회로

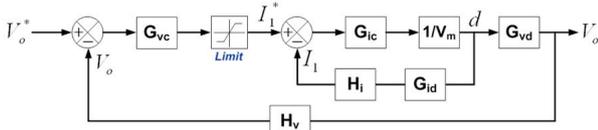


그림 3 충전기용 제어 알고리즘 블록 다이어그램

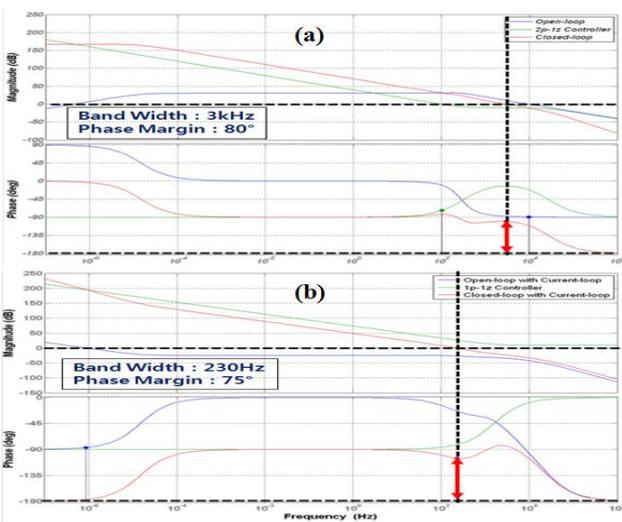


그림 4 보드선도를 이용한 제어기 설계  
(a) 전류제어 루프 (b) 전압제어 루프

## 2.2 이중 루프 제어기의 설계

그림 3은 이중 제어 루프를 이용한 충전기용 제어 알고리즘 블록 다이어그램이다. 컨버터의 출력전압을 제어(CV Mode)하기 위한 외부 제어 루프와 인덕터 전류를 제어(CC Mode)하기 위한 내부 제어 루프로 구성되어 있다. 출력전압( $v_o$ )을 검출하여 기준 전압( $v_o^*$ )과 비교한 뒤 오차신호를 만들며, 이 오차신호는 전압 제어기에 인가되어 전류제어기의 기준 전류( $i_L^*$ )를 만든다. 이때 배터리는 최초 정전류 모드로 충전되어야 하므로 컨버터의 기준전류는 배터리의 충전전류 값으로 제한되어야 한다. 기준 전류는 인덕터 전류( $i_L$ )와 비교되어 오차를 생성하여 내부제어기로 전송하고, 비교기는 제어기의 출력과 삼각파를 비교하여 주스위치의 위상을 제어하기 위한 펄스 파형을 출력한다<sup>[2]</sup>.

그림 4(a)는 인덕터 전류 제어 전달함수를 이용한 제어기 설계를 보드선도를 통해 수행한 과정을 나타낸다. 교차 주파수는 3kHz로 선정하였으며, 이때 제어전달 함수의 이득의 기울기는  $-20\text{dB/dec}$ 이며, 위상은  $-90^\circ$ 로 충분한 위상여유를 확보하고 있지만 배터리의 큰 커패시턴스 성분에 의해 저주파 이득이 낮다. 따라서 2개의 극점과 1개의 영점을 갖는 제어기를 설계하고 원점에 극점을 배치함으로써 저주파 이득을 크게 하였다.

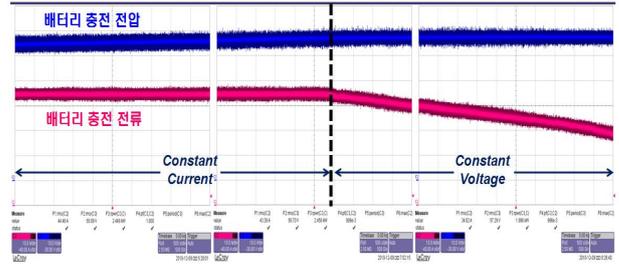


그림 5 CC/CV 모드의 배터리 충전 실험 프로파일

그림 4(b)는 전압루프 제어기의 설계를 보드선도를 이용하여 수행한 과정이다. 이때 컨버터의 출력전압은 배터리의 양단 전압에 의해 정해지며, 교차주파수는 230Hz로 낮으나 충전 시 부하량이 급변하지 않기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 교차주파수에서 Open-loop 제어전달함수는 위상여유를 가지고 있지만, 평탄한 이득특성을 보인다. 따라서 1개의 극점과 1개의 영점을 가지는 PI 제어기를 이용하여 저주파 영역의 루프 이득을 증가시켰으며, 교차주파수에서  $-20\text{dB/dec}$ 의 기울기 특성을 갖도록 설계하였다.

## 2.3 실험 및 고찰

3kW급 충전기를 제작하고 이를 실험해보았다. PFC 제어를 위해 연속전류모드의 상용 IC인 NCP 1653A를 이용하여 제어하였으며, 컨버터 충전 제어 알고리즘을 구현하기 위해 TMS320F28335를 이용하였다. 실험에 사용한 배터리는 공칭용량은 365Ah, 공칭전압은 48V로 실제 전동지게차에 사용되고 있는 제품을 이용하였다. 그림 5는 CC/CV 모드의 충전기 실험 결과로서 CC모드의 충전기간 동안 배터리 충전 전류 파형은 지령 전류 값인 45A로 제어되며 이때 배터리 전압 파형은 충전상한전압에 도달할 때까지 서서히 증가되는 것을 알 수 있다. 충전상한전압에 이르면 충전 제어알고리즘에 의해 CV모드로 동작하게 되며, 배터리의 전압은 57.4V로 일정하게 유지되며 충전전류가 감소된다.

## 3. 결론

본 논문에서는 전동지게차용 납축전지의 충전을 위해 Current Doubler를 이용한 위상천이 폴 브리지 컨버터를 선정하여 배터리 충전기를 제작하였다. 배터리의 CC/CV 모드 충전을 인덕터 전류 및 출력전압의 이중 제어 루프를 통해 간단하게 구현하였으며, 실제 납축전지의 충전 실험을 통해 동작을 검증하였다.

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임

## 참고 문헌

- [1] N.H. Kutkut, G. Luckjiff, "Current mode control of a full bridge dc-to-dc converter with a two inductor rectifier", Proceedings of IEEE PESC, pp. 203-209, June, 1997.
- [2] X. Huang, et al., "Parasitic ringing and design issues of digitally controlled high power interleaved boost converters", IEEE Trans. Power Electro., vol. 19, no. 5, Sep., 2004.