

# 단상 토렘폴 Power Factor Correction 컨버터를 위한 전류 제어기법의 비교 분석

윤지현, 김이삭, 장원용, 김민우, 정현우, 이승준, 이채연, 박정욱  
연세대학교

## Comparative Analysis of Current Control Methods for Single Phase Totem Pole Power Factor Correction Converter

Jihyeon Yun, Issac Kim, Won-Yong Jang, Minwoo Kim, Hyeonwoo Jung, Seungjun Lee, Chaeyeon Lee, Jung-Wook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

본 논문에서는 단상 토렘폴 power factor correction (PFC) 컨버터의 전류 제어기법에 따른 정상 상태 오차 및 제어 성능을 분석한다. PFC 컨버터의 입력 전류 제어 시 continuous conduction mode (CCM) 제어기법을 적용하면 전류의 첨두치 감소 및 스위칭 손실 감소 효과를 얻을 수 있다. CCM 제어 시 주로 사용하는 평균 전류 제어기법은 정상 상태 오차가 0에 도달할 수 없다는 단점이 있으나 AC를 DC처럼 제어할 수 있는 회전 좌표계 기반 전류 제어기법의 경우 정상 상태 오차가 0이 되어 우수한 제어 성능을 달성할 수 있다. 본 논문에서는 토렘폴 PFC 컨버터의 회전 좌표계 기반 전류 제어기법을 소개하고 정상 상태 오차 제거 성능을 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 툴을 이용해 비교 및 분석한다.

### 1. 서론

Power factor correction (PFC) 컨버터는 입력 전류 동작에 따라 continuous conduction mode (CCM), discontinuous conduction mode (DCM), critical conduction mode (CrCM) 제어기법이 있다. 또한, 일반적으로 대전력 기기에는 전류의 피크값 감소 및 스위칭 손실 감소 효과를 얻을 수 있는 CCM 제어 기법이 사용되고 있다. 하지만, 기존의 CCM 제어기법은 제어 파라미터인 입력 전류가 AC 이기 때문에 정상 상태 오차가 0에 도달하기 힘들다는 단점이 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 AC를 DC처럼 제어할 수 있는 회전 좌표계 기반 전류 제어기법을 적용하면 정상 상태 오차가 0이 되어 우수한 제어 성능을 달성할 수 있다.<sup>[1],[2]</sup>

본 논문에서는 전기자동차용 토렘폴 PFC 컨버터의 회전 좌표계 기반 전류 제어기법을 소개하고 정상 상태 오차 제거 성능을 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 툴을 이용해 비교 및 분석한다.

### 2. 토렘폴 PFC 컨버터 제어기법

#### 2.1 기존 CCM 제어기법

전기자동차의 on board charger (OBC)는 AC-DC 컨버터로 양방향 동작이 가능하고 전력 효율이 높은 토렘폴 PFC 컨버터를 주로 사용하며 토폴로지는 그림 1과 같다. 그림 2와

같이 기존 CCM 제어기는 전압 제어와 전류 제어 루프를 구성되어 있다. 전압 제어 루프를 통해 전류 지령 신호의 크기를 결정하고 입력 전압의 주파수 및 위상 정보를 이용하여 전류 지령 신호를 정현파 형태로 생성한다. 또한, 전류 제어 루프를 통해 스위칭 소자의 게이트 신호를 생성한다. 하지만 기존 CCM 제어기법을 적용하면 입력 전류의 평균 값이 정현파를 따라가지만 정상상태 오차가 0에 도달할 수 없다.

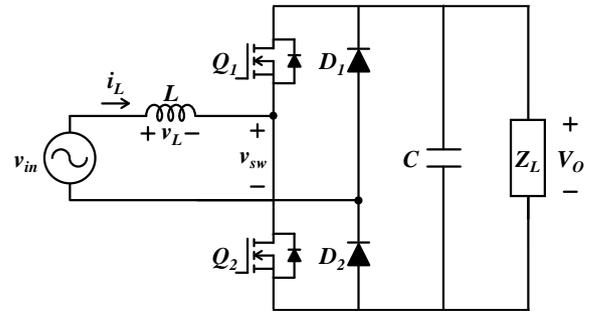


그림 1 토렘폴 PFC 컨버터 토폴로지  
Fig.1 Topology of totem pole PFC converter

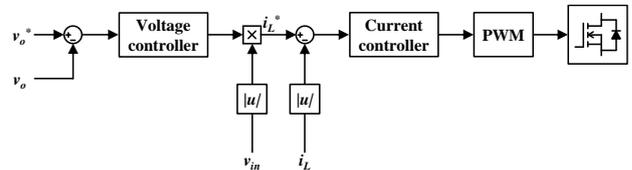


그림 2 기존 CCM 제어기법의 블록 다이어그램  
Fig.2 Block diagram of conventional CCM control method

#### 2.2 회전 좌표계 기반 전류 제어기법

회전 좌표계 기반 전류 제어기법은 AC 신호에 회전 좌표계 변환을 적용하여 DC 신호처럼 제어하는 방식으로 제어가 간단하며 정상 상태 오차를 감소시킬 수 있다. 단상 신호에 회전 좌표계 변환을 적용하려면 기존 신호를 90도 지연 시켜 alpha-beta ( $\alpha\beta$ ) 성분으로 변환한 후 Park transformation을 적용하여 direct-quadrature (DQ) 성분으로 변환한다. 기존 단상 신호  $u$ 를  $\alpha\beta$  성분  $u_{\alpha\beta}$ 와  $u_{\beta}$ 로 변환하는 식은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u_{\alpha}(t) = u(t) = U \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$u_{\beta}(t) = U \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{2}$$

$a\beta$  성분을 이용한 Park transformation과 역 Park transformation은 각각 식 (3)과 식 (4)으로 계산한다.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

전류 제어 루프는 boost 인덕터에 voltage second balance를 적용하여 설계하며, 아래와 같은 과정으로 계산한다.

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - v_{sw} \quad (5)$$

$$L \frac{d}{dt} [i_d \sin(\omega t) + i_q \cos(\omega t)] \quad (6)$$

$$= V_m \sin(\omega t) - (V_{sw,d} \sin(\omega t) + V_{sw,q} \cos(\omega t)) \quad (7)$$

$$V_{sw,d} = \omega L I_q + V_{in} \quad (7)$$

$$V_{sw,q} = -\omega L I_d \quad (8)$$

그림 3과 같이 회전 좌표계 기반 전류 제어기법을 적용하는 경우 전압 제어 루프를 통해 DQ 축 상의 전류 지령 신호를 생성하고, 입력 전류 제어를 통해 pulse width modulation (PWM)의 지령 신호를 생성한다. PWM 지령 신호는 단상 형태로 입력되어야 하기 때문에 식 (4)를 사용하여  $a$ 성분 즉 단상 AC 신호로 변환한다.

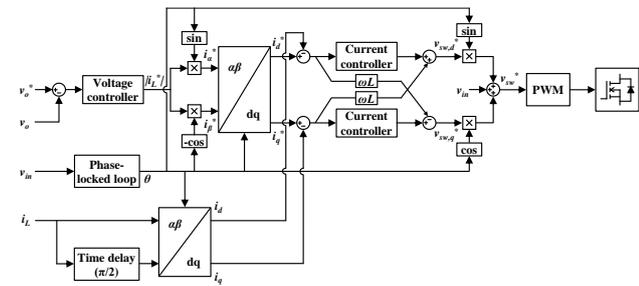


그림 3 회전 좌표계 기반 전류 제어기법의 블록 다이어그램  
Fig.3 Block diagram of rotating reference frame based current control method

### 2.3 시뮬레이션

토탈폴 PFC 컨버터의 기존 CCM 제어기법과 회전 좌표계 기반 전류 제어기법의 정상 상태 오차 감소 성능을 비교하기 위해 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 진행했다. 시스템 사양은 표 1과 같다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 기존 CCM 제어기법은 입력 전류의 정상 상태 오차가 약 7.8 A 이고 출력 전압의 정상 상태 오차가 약 23.5 V 발생하는 반면 그림 5에서 볼 수 있듯이 회전 좌표계 기반 전류 제어기법은 입력 전류의 정상 상태 오차가 0으로 수렴하고 출력 전압의 정상 상태 오차가 약 50 V 인 것을 확인할 수 있다.

표 1 토탈폴 PFC 컨버터의 회로 설계 사양

Table 1 Parameters of totem pole PFC converter

Parameter	Value
입력 전압 ( $V_{in}$ )	220 [Vrms]
출력 전압 ( $V_o$ )	400 [V]
출력 전력 ( $P_o$ )	11 [kW]
Boost 인덕터 ( $L$ )	200 [ $\mu$ H]
입력 주파수 ( $f_{in}$ )	60 [Hz]
스위칭 주파수 ( $f_{sw}$ )	50 [kHz]
DC-link 캐패시터 ( $C$ )	3.3[mF]

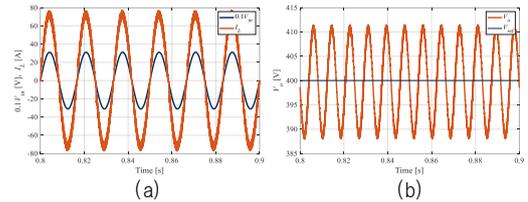


그림 4 기존 CCM 제어기법 시뮬레이션 파형 (a) 입력 전류 (b) 출력 전압  
Fig.4 Simulation waveforms of conventional CCM control method (a) Input current (b) Output voltage

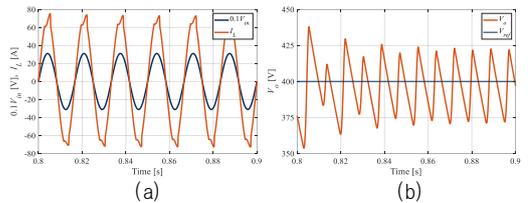


그림 5 회전 좌표계 기반 전류 제어기법의 시뮬레이션 파형 (a) 입력 전류 (b) 출력 전압  
Fig.5 Simulation waveforms of rotating reference frame based current control method (a) Input current (b) Output voltage

## 3. 결론

본 논문에서는 토탈폴 PFC 컨버터의 continuous conduction mode (CCM) 제어 시 발생하는 입력 전류 리플과 정상 상태 오차 문제를 해결하기 위해 회전 좌표계 기반 전류 제어기법을 소개하고, MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 두 제어기법의 성능을 확인하였다. 회전 좌표계 기반 전류 제어기법 적용시 입력 전류의 정상 상태 오차를 저감 시킬 수 있다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

## 참고 문헌

[1] D. Kanavaros, G. Oriti and A. L. Julian, "Novel Implementation and Comparison of Active and Reactive Power Flow Control Methods in a Single Phase Grid-Connected Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 1631-1639, March-April 2020.

[2] U. A. Miranda, L. G. B. Rolim and M. Aredes, "A DQ Synchronous Reference Frame Current Control for Single-Phase Converters," in *Proc. 36th IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1377-1381, 2005.