

# 3상 PFC 컨버터 제어를 위한 PI 제어기와 PR 제어기 비교 분석

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

## Comparison of PI Controller and PR Controller for Three-Phase PFC Converter

Chaeyeon Lee, Issac Kim, Wonyong Jang, MinWoo Kim, Jihyeon Yun, Seungjun Lee, Hyeonwoo Jung, Jungwook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

OBC(On-board charger)에는 교류를 직류로 변환하고 DC link 전압을 제어하기 위한 AC/DC 정류기로 PFC(Power factor correction) 컨버터가 사용되며 이를 제어하기 위한 다양한 종류의 제어 기법이 연구되었다. 본 논문에서는 PFC 컨버터 제어에 사용되는 비례 적분(proportional integral, PI) 제어기와 비례 공진(proportional resonant, PR) 제어기를 비교·분석한다. 또한, MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 PI 제어기 및 PR 제어기의 성능을 비교·분석 한다.

어해서 피상 전력을 유효 전력에 근접시킨다. 이를 통해, 교류 전력을 직류 전력으로 바꾸는 과정에서 생기는 전력 손실을 저감하고 효율을 증대시킨다.

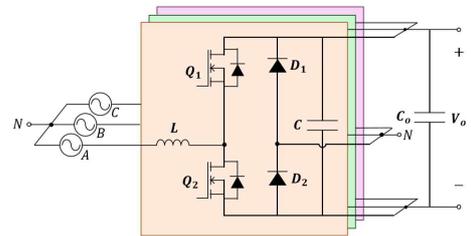


그림 2 3상 토렘폴 PFC 컨버터  
Fig. 2 three-phase totem-pole PFC converter

### 1. 서론

전기자동차에 대한 관심이 증가함에 따라 전기자동차 내부 전력변환장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉, 그림 1에 나타난 EMI(Electromagnetic Interference) filter와 교류 전압을 직류 전압으로 변환하는 PFC 컨버터, DC-DC 컨버터에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 전력 품질에 관한 중요성과 EMI에 의한 규정이 정해짐에 따라 전력변환장치의 입력 역률을 보상하고, 입력 전류의 THD를 저감하기 위해 PFC 컨버터에 관한 연구가 진행되고 있다.

### 2.2 제어시스템

그림 3은 3상 토렘폴 PFC 컨버터의 전체 제어 블록도이다. 3상 토렘폴 PFC 컨버터의 출력 전압인 DC link 전압은 PI 제어기로 제어하고 전압 제어기의 출력이 전류 지령이 된다. 또한, 전류 제어 블록인 current controller 블록에는 PI 제어기와 PR 제어기를 적용하여 비교하였다.

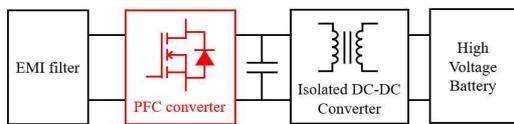


그림 1 전기자동차 충전기 블록선도  
Fig. 1 Block diagram of EV charger

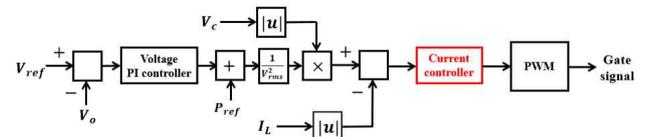


그림 3 3상 토렘폴 PFC 컨버터 제어 블록도  
Fig. 3 A control block diagram of three-phase totem-pole PFC converter

본 논문에서는 PFC 컨버터를 위한 제어기로써 사용되는 PI 제어기와 PR 제어기를 비교 분석한다.

### 2. 본론

#### 2.1 3상 토렘폴 PFC 컨버터 모델링

그림 2는 본 논문에서 사용하는 3상 토렘폴 PFC 컨버터의 회로를 나타낸다. 상마다 2개의 다이오드, 2개의 스위치, 1개의 인덕터와 1개의 커패시터로 구성되어 있다. PFC 컨버터는 제어기를 통해 출력 전압을 제어하고 역률을 개선하여 역률을 1에 가깝게 만든다. 즉, 전압과 전류의 위상차를 0°에 가깝게 제

#### 2.2.1 비례 적분 제어기

PI 제어기는 일반적인 피드백 제어 알고리즘 중 하나로써 비례기와 적분기로 구성된다. 비례기는 현재 오차의 크기에 비례하여 비례 이득,  $k_p$ 를 조절함으로써 오차를 빠르게 감소시켜 원하는 값에 수렴하도록 한다. 적분기는 누적된 오차에 따라 적분 이득,  $k_i$ 를 조절함으로써 정상상태 오차가 있을 때 오차들을 적분한다. PI 제어기의 전달함수는 식 (1)와 같이 표현할 수 있다.

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \tag{1}$$

## 2.2.2 비례 공진 제어기

PR 제어기는 비례기와 공진 적분기로 구성되어 있으며, 특정 주파수에서 무한대의 이득 값을 갖고 그 외의 주파수에서는 이득이 0에 수렴하는 제어기이다. 공진 적분기는 공진 주파수,  $\omega_c$ 에서 이득을 매우 크게 증가시켜 정상 상태에서 크기 및 위상 오차를 제거할 수 있다. 또한, PR 제어기의 전달함수는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega_c^2} \quad (2)$$

## 2.3 시뮬레이션 결과

3상 토렘폴 PFC 컨버터를 제어하는데 사용되는 PI 제어기와 PR 제어기의 성능을 비교하기 위해 표 1의 사양을 갖는 컨버터를 설계하고 MATLAB/Simulink를 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4는 PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 이때 역률은 0.9999이고, 전류의 THD 값은 0.1010이다. 그림 5는 PR 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 이때 역률은 0.9998이고, 전류의 THD 값은 0.1062이다. 즉, PI 제어기와 PR 제어기의 결과를 비교해보면, PI 제어기가 PR 제어기보다 역률이 높고 THD가 낮다는 것을 확인할 수 있다.

표 1 3상 토렘폴 PFC 컨버터 회로 파라미터  
Table 1 Parameter of three-phase totem-pole PFC converter

Parameter	Value	Parameter	Value
입력 전압	3상 220 Vac	인덕터	15 mH
입력 주파수	60 Hz	커패시터	2 mF
출력 전압	400 Vdc	스위칭 주파수	50 kHz
정격전력	1 kW	토폴로지	3상 토렘폴 PFC 컨버터

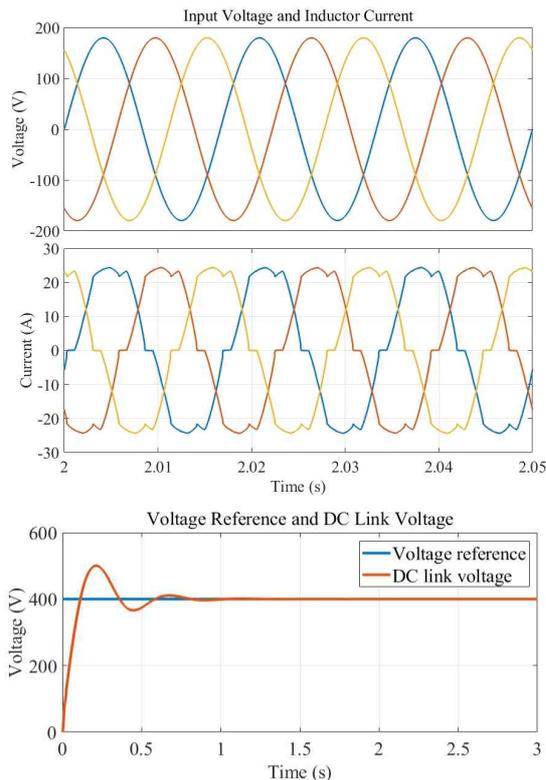


그림 4 PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation result of using PI controller

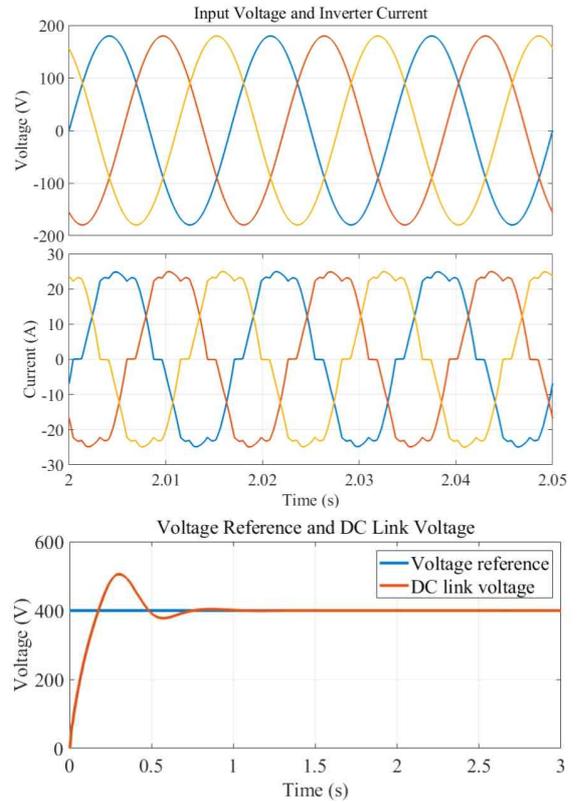


그림 5 PR 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation result of using PR controller

## 3. 결론

본 논문은 3상 토렘폴 PFC 컨버터를 제어하는데 사용되는 PI 제어기와 PR 제어기의 성능을 비교·분석한다. 또한, MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 3상 토렘폴 PFC 컨버터의 동작을 확인하였다. 이를 통해 3상 토렘폴 PFC 컨버터를 제어하였을 때 PI 제어기의 성능이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

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

## 참고 문헌

- [1] J. W. -T. Fan, R. S. -C. Yeung and H. S. -H. Chung, "Optimized Hybrid PWM Scheme for Mitigating Zero-Crossing Distortion in Totem-Pole Bridgeless PFC," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 1, pp. 928-942, 2019, Jan.
- [2] X. Guo, H. -P. Ren and J. Li, "Robust Model-Predictive Control for a Compound Active-Clamp Three-Phase Soft-Switching PFC Converter Under Unbalanced Grid Condition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 3, pp. 2156-2166, March 2018.