

고속전철용 단상 PWM 컨버터의 순시 전류 PR 제어 기법

이헌수, 조성준, 정만규, 이광주
현대중공업(주)

Instantaneous Current PR Control Method of Single-phase PWM Converter for High Speed Train

Heon-Su Lee, Sung-Joon Cho, Man-Kyu Jeong, Kwang-Ju Lee
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문은 특정 주파수 대역에서 큰 이득을 갖는 PR 제어기를 이용한 단상 PWM 컨버터의 전류 제어 기법에 대해 제안한다. 고속전철 주전력변환장치는 단상 PWM 컨버터와 3상 인버터로 구성되며, 단상 PWM 컨버터는 단위 역률 제어와 가선전류 고조파 저감을 위하여 빠른 동특성을 갖는 순시 전류 제어 방법이 필요하다. 일반적으로 순시 전류 제어를 위해서 사용되는 동기 좌표계 PI 제어기는 연산량이 증가하고, 정지 좌표계 PI 제어기는 정상상태 오차가 발생하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완할 수 있는 순시 전류 제어 방법을 시뮬레이션과 시험을 통하여 검증하였다.

1. 서론

고속전철 단상 PWM 컨버터는 가선전압을 입력 받아 전압과 동상인 전류가 흐르도록 역률 제어를 수행하면서 DC-link 전압이 DC 2,800V로 일정하게 유지 되도록 제어한다. 컨버터의 순시 전류 제어에 사용되는 정지 좌표계 PI 제어기는 교류 지령 값에 대해 낮은 이득 값을 가지고 있기 때문에 교류 전류 제어에 있어서 정상상태 오차를 발생시킨다. 동기 좌표계 PI 제어기는 교류에서 직류로 변환한 값을 제어하기 때문에 정상상태 오차를 제거할 수 있어서 교류 전류 제어에서 정지 좌표계 PI 제어기보다 우수한 성능을 가진다. 하지만 동기 좌표계 PI 제어기는 동기좌표축에서 정지좌표축으로 변환하고 이를 다시 동기좌표축으로 변환하는 과정을 거쳐야 하기 때문에 연산량이 증가하게 되고, 또한 단상 시스템에는 적용이 더욱 어렵다. 본 논문에서는 복잡한 연산과정 없이 교류 입력의 정상상태 오차를 제거할 수 있고, 단상 시스템에 적용 가능한 PR(Proportional Resonant) 제어기를 이용하여 단상 컨버터의 순시 전류를 제어하는 방법에 대해 제안한다.

2. 단상 PWM 컨버터 전류 제어기법

2.1 고속전철용 주전력변환장치 단상 PWM 컨버터

고속전철 주전력변환장치의 전력회로는 그림1과 같으며, 1대의 주전력변환장치는 2대의 단상 컨버터와 1대의 3상 인버터로 구성된다. 주변압기는 가선으로부터 AC 25kV를 입력받아 AC 1,400V로 강압하여 컨버터에 공급하고, 컨버터는 주변압기로부터 공급받은 AC 1,400V를 DC 2,800V로 변환하여 인버터에 공급한다. 인버터는 DC 2,800V를 AC로 변환하여 유도전동기 2대를 구동한다. 2대의 컨버터는 하나의 DC-link를 공유하며 병렬로 운전되며, 역률 제어와 가선 전류의 고조파 저감을 위해 빠른 동특성을 가지는 순시 전류 제어 방법이 필요하다.^[1]

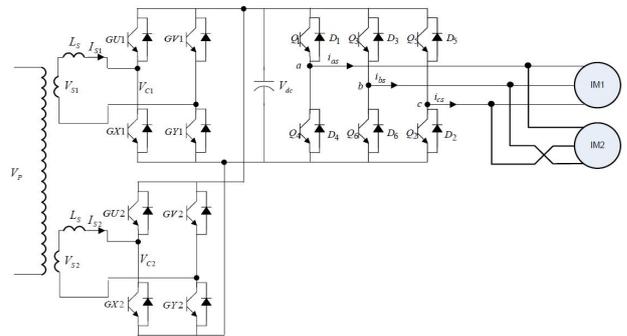


그림 1. 주전력변환장치 전력회로

2.2 비례공진(PR) 제어기

PI 제어기는 정지좌표계에서 교류 입력에 대해 정상상태 오차가 발생하기 때문에 식(1)을 통해 정지 좌표계에서 사용할 수 있는 형태로 변형시키면 식(2)와 같고, 이를 실제 시스템에 적용 가능한 형태로 변형시키면 식(3)과 같은 PR제어기의 전달 함수가 된다. 그림 2의 보드 선도에서 볼 수 있듯이 PR 제어기는 특정 주파수에서 큰 이득 값을 가지기 때문에 교류 지령 값에 대해 정상상태 오차를 제거할 수 있고, 복잡한 좌표변환 과정 없이 정지 좌표계에 적용이 가능하다.^[2]

$$G_{AC}(s) = \frac{G_{DC}(s + j\omega) + G_{DC}(s - j\omega)}{2} \quad (1)$$

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (3)$$

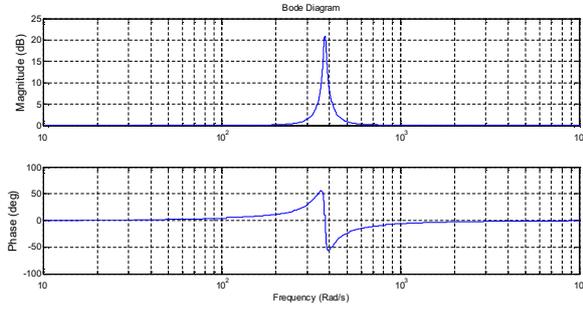


그림2. PR제어기의 보드선도

2.3 단상 PWM 컨버터 순시 전류 PR 제어 방법

단상 PWM 컨버터의 순시 전류 제어 알고리즘 블록도는 그림 3과 같다. DC-link 전압의 오차 값을 PI 제어기에 입력하여 출력 값 $i_m/2$ 를 생성하고, 여기에 전원전압의 위상검출을 통해 구한 $\sin\omega t$ 를 곱하여 전원전압과 동상인 교류 전류 지령 값 i_s^* 를 생성한다.[3] 이 전류 지령 값과 각 컨버터의 입력전류 i_{s1} , i_{s2} 와 비교하여 오차 값을 PR 제어기에 입력하고, 출력된 값에 전원전압 V_s 를 전향보상하여 전압 지령 V_{c1}^* 과 V_{c2}^* 를 생성해 PWM 제어기를 통하여 게이팅 신호를 인가한다.

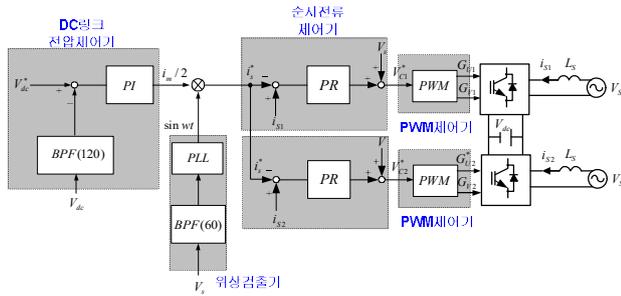
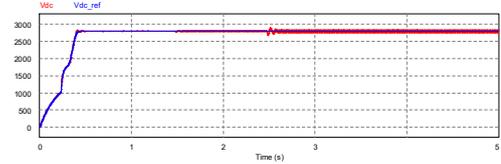


그림3. 컨버터 순시 전류 제어 알고리즘

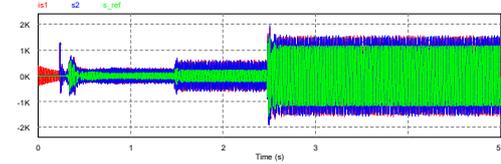
그림 4에 시뮬레이션 파형을 나타내었다. DC-link 전압은 일정하게 제어 되고 있으며, 확대 파형에서 전류가 교류 전류 지령 값을 정상상태 오차 없이 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5는 소형모델을 이용한 실험의 전류 파형이다. 컨버터 입력전압은 AC 270V, DC-link 전압은 540V, 저항 부하는 11.2Ω의 조건으로 실험을 수행 하였다.

3. 결론

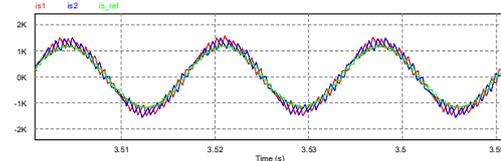
본 논문에서는 고속전철용 단상 PWM 컨버터의 순시 전류 PR 제어 기법에 대해 제안하였다. PR 제어기를 사용하여 복잡한 연산과정 없이 교류 지령 값에 대해 정상상태 오차를 제거하여 기존의 정지좌표계 PI 제어기와 동기좌표계 PI제어기의 단점을 보완하였다. 시뮬레이션과 소형모델 시험을 통하여 제어 기법의 타당성을 검증하였다.



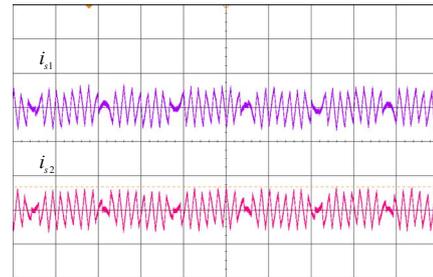
(a) DC-link 전압



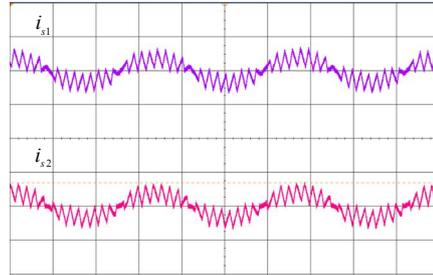
(b) 컨버터 입력전류



(c) 컨버터 입력전류 확대
그림4. 시뮬레이션 파형



(a) 무부하 전류



(a) 저항부하 전류

그림 5. 소형모델 실험 파형

참고 문헌

- [1] 조성준, 정만규, 이광주, 박건태, “KTX-산천 고속열차 추진제어장치 개발”, 전력전자학술대회논문집, pp295~296, 2010.7.
- [2] D.N. Zmood, D.G. Holmes, “Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverter with Zero Steady State Error”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, Issue 3, pp814~822, May 2003.
- [3] 정만규, 조성준, 이광주, 박건태, “고속전철용 추진제어장치의 관성부하 시험에 관한 연구”, 전력전자학술대회논문집, pp369~371, 2009.7.