

3차 고조파 주입과 PR 제어를 이용한 단상 PWM 컨버터의 커패시터 용량 저감 기법

김 규동, 양 현석, 이 동명
홍익대학교 전자전기공학부

Capacitance reduction method for single-phase PWM converters using the 3rd harmonic injection and PR controller.

Gyu Dong Kim, Hyun Suk Yang, and Dong Myung Lee
School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In this paper, we inject input currents having 3rd harmonic to reduce the capacitance of DC link capacitors in single phase converters. If the input current with third harmonic is injected, the required capacitance can be reduced by minimizing the difference between the input and output power. To control the input current, instead of PI control done in rotating frame, PR controller is used with the proposed separate current control method for fundamental and 3rd harmonic components. The validity of the proposed method has been demonstrated by simulation results.

1. 서 론

본 논문은 단상 NPC(Neutral Point Clamped) 컨버터 구조에서 직류 링크단 커패시터의 용량을 줄이기 위해 입력 전류에 3차 고조파를 주입하는 기법에서 3차 고조파를 제어하는 기법을 제안한다. 3차 고조파 전류가 주입이 되는 경우 필요한 DC 링크 커패시터 용량은 입력 전력과 출력 전력의 차이를 최소화하여 줄일 수 있다. 고조파 전류 제어를 위해서, 회전좌표계 PI 제어를 적용하지 않고, PR 제어를 적용하며, 3고조파 및 기본파 제어를 위하여 본 연구에서는 각 성분을 분리 제어하는 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 기법의 타당성을 보인다.

2. 제어 방법

2.1 커패시터 용량 감소 원리

3고조파 주입에 따른 커패시터 용량 감소 방법은 Barrado등에 의하여 검증되었다. 3차 고조파가 입력 전류로 주입되는 경우 필요한 커패시터 용량은 입력 순간 전력과 출력 전력 차이로 이를 최소화 하여 커패시터 용량을 줄일 수 있다[1].

2.1.1 3차 고조파 주입 법 구현

a 상 형상을 아는 경우, 이를 통해서 크기가 $\frac{1}{6} \sin 3\theta$ 인 3차 고조파 형상은 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{asmo} &= I \sin \theta + \frac{1}{6} I \sin 3\theta \\ &= I \sin \theta + \frac{1}{6} I [3 \sin \theta - 4 \sin^3 \theta] \\ &= \frac{3}{2} I \sin \theta - \frac{2}{3} \frac{(I \sin \theta)^3}{I^2} \end{aligned}$$

$$= \frac{3}{2} I_a - \frac{2}{3} \frac{I_a^3}{I_a^2 + I_b^2}, \quad \text{where } (I^2 = I_a^2 + I_b^2) \quad (1)$$

2.1.2 3차 고조파 주입에 따른 커패시터 용량 저감

식(2), (3)은 입력된 전류 전압방정식이다.

$$i_{in}(t) = I_m \sin \omega t \quad (2)$$

$$v_{in}(t) = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

앞서 언급한 식(2), (3)을 보면 입력 전원은 식(4)가 된다.

$$P_{in}(t) = V_{in}(t) I_{in}(t) = \frac{V_m I_m (1 - \cos 2\omega t)}{2} \quad (4)$$

회로에 전력 손실이 없다고 가정을 하면 커패시터에서 AC의 입력전력을 DC의 출력전력으로 변환시키기 위해 에너지를 충방전 역할을 하는데 평균 입력과 출력 전력이 동일함을 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{V_m I_m}{2} = P_o \quad (5)$$

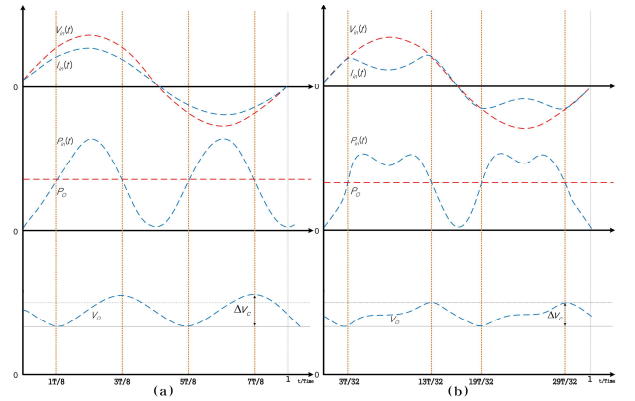


Fig. 1 (a) Waveforms without 3rd harmonic injection, and (b) those with 3rd harmonic injection

그림 1(a)는 그림 1(b)를 비교해보면 전류에 3차 고조파 주입 전과 후 커패시터 충전 양 ΔV_c 의 값이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

다음은 그림 1에서 볼 수 있듯이 35%의 3차 고조파를 주입하여 커패시터 용량의 변화량을 수치적 계산을 하였다.

$$i_{in}(t) = I_m \sin \omega t + 0.35 I_m \sin 3\omega t$$

$$p_{in}(t) = V_m I_m \sin^2 \omega t + 0.35 V_m I_m \sin \omega t \cdot \sin 3\omega t$$

$$= \frac{V_m I_m (1 - \cos 2\omega t)}{2} - \frac{0.35 V_m I_m (\cos 2\omega t - \cos 4\omega t)}{2} \quad (6)$$

$$= \frac{V_m I_m (1 - 0.65 \cos 2\omega t - 0.35 \cos 4\omega t)}{2}$$

그림 1(b)에서 보여주는 것과 같이 $\frac{3T}{32} \sim \frac{13T}{32}$ 동안 충전이 되기 때문에 ΔE 는 다음 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\Delta E = \int_{\frac{3T}{32}}^{\frac{13T}{32}} [p_{in}(t) - P_o] dt \quad (7)$$

$$= (0.7243) \frac{P_o}{\omega}$$

결과적으로 35%의 고조파 주입 시 기존대비 약 28%의 용량 저감을 확인 할 수 있다.

2.2 PR(Proportional Resonance) 제어기

정현파를 제어하는 경우 PR 제어기는 PI제어기에 비하여 교류 계통의 상용주파수에서 무한대의 이득을 갖고 정상상태 오차를 감소시키는데 탁월하다. 커패시터 용량을 줄이기 위하여 3차 고조파 주입을 사용하므로, 정지좌표계 전류 제어를 위한 PR 제어기를 사용한다. PR 제어기의 고조파 보상 특징은 기본적인 제어기의 역할에 영향을 주지 않으며, 선택된 공진 주파수에 대해서만 보상을 한다[2].

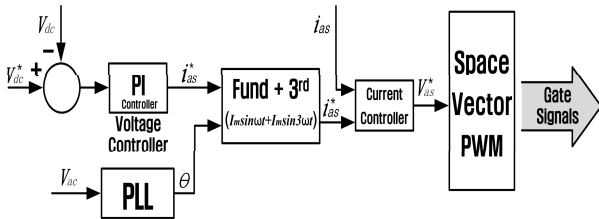


Fig. 2 Proposed DC-link voltage control scheme

PR 제어기의 이상적인 전달함수는 식(8)과 같으며 특정 고조파 제어 K_i 는 식(9)로 나타내어진다.

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (8)$$

$$G_h(s) = \sum_{h=3,5,7} \frac{K_{ih} s}{s^2 + (\omega \cdot h)^2} \quad (9)$$

그림 2는 PR 제어기 전체 구조이며 전류 제어기 구성은 아래의 그림 3과 같다.

2.2.1 제안하는 PR 제어기

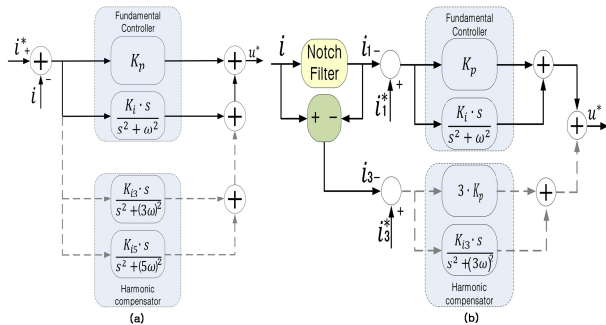


Fig. 3 (a) Conventional PR controller, and (b) proposed PR controller

기존의 PR 제어기의 구성을 보자. 그림 3(a)와 같이 메인 제어기에 병렬로 간단하게 PR 제어기와 고조파 보상 기능을 추가 한다. 이런 경우 원하는 특정 고조파만 선택하여 제어가

가능하지만 기본파와 3차 고조파 비례이득 K_p 값이 같이 공유하여 사용하기 때문에 이 기존 제어 방법보다 효과적으로 전류를 제어 해보기 위하여 그림 3(b)와 같이 3차 고조파를 분리하여 기본파와는 다른 별도의 K_p, K_i 값의 이득을 결정하여 3고조파를 분리 제어한다.

3차 고조파의 제어기 중 비례이득 K_p 의 값의 설정은 제어하고자 하는 3차 고조파의 차수를 곱하여 대역폭을 크게 하고 정상상태 오차를 감소시키며 속응성이 향상 된다.

3. 시뮬레이션 결과

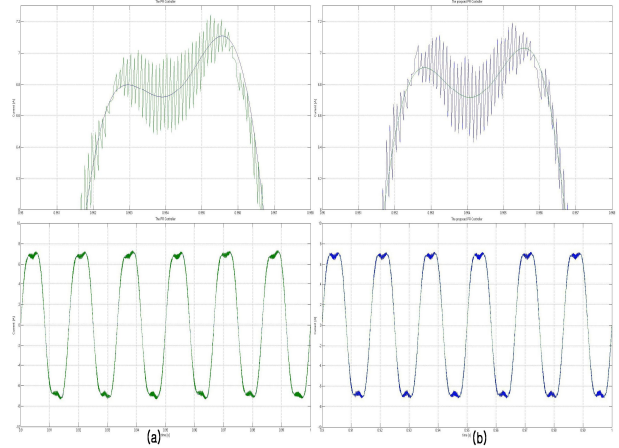


Fig. 4 Simulation waveform obtained from (a) conventional PR controller, and (b) the proposed PR controller

그림 4(a)의 기존의 제어기보다 그림 4(b)의 제안된 PR 제어기의 전류 지령 파형과 고조파 전류의 추정성에서 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단상 NPC 3 레벨 컨버터 구조에서 DC링크단의 커패시터 용량을 줄이기 위하여 3차 고조파를 전류에 주입하는 방법을 고찰하였으며, 기본파와 고조파를 분리 제어하는 PR 제어기를 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 기법이 기본 기법에 비해서 전류 추정성이 향상됨을 확인하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010 0008884)

참고 문헌

- [1] A. Barrado, M. Sanz, V. Salas, and E. Olias, "New Power Factor Correction AC-DC Converter With Reduced Storage Capacitor Voltage," *IEEE Trans. on Indus. Elec.*, vol. 54, no. 01, pp. 384-397, Feb. 2007.
- [2] D.N. Zmood, and D.G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 03, pp. 814-822, 2003.