

## 고조파 주입법에 의한 3상 부스트 정류기의 고조파 저감

이준구, 박석하, 김진성, 김양모  
충남대학교 전기공학과

### Harmonic Reduction of a Single-Switch Three-Phase Boost Rectifier using Harmonic-Injection Method

Joon-Ku, Lee, Sok-Ha Park, Jin-Sung, Kim, Yang-Mo, Kim  
Dept. of Electrical Eng. Chungnam National Univ.

**Abstract** - In this paper, we present harmonic reduction of a Single-Switch Three-Phase Boost Rectifier which is operated at 25kHz. A simulation result shows that input current harmonics of Single-Switch Three-Phase Rectifier are reduced by Harmonic-Injection Method. Sixth harmonic is used for Harmonic-Injection Method

#### 1. 서 론

AC/DC 변환은 위상이동 정류기나 다이오드 정류기를 사용하여 이루어진다. 다이오드 정류기는 위상이동 정류기에 비해 회로의 간결성,싼 가격 및 제어의 용의성 등의 장점 때문에 많이 사용되고 있으나, 부하의 변화에 따른 입력 전류의 불연속 구간이 생기고, 이에 따른 고조파가 발생한다

3상 정류기의 전원측으로부터 들어오는 고조파 성분들은 효율 저감의 원인이 되고, 출력용량을 크게 할수록 고조파 성분들도 커지기 때문에 대용량의 사용에 있어서 입력 전류 왜곡은 심각한 문제가 되었다. 따라서 전원측으로부터 들어오는 고조파의 억제는 중요한 문제로 인식되고 있으며, 무엇보다도 다른 고조파보다 큰 제 5고조파의 억제가 중요하다.[1, 2, 4, 5]

그래서, 본 논문에서는 3상 부스트 정류기에서의 고조파 발생 원인을 분석하고, 고조파를 억제할 수 있는 액티브 필터링 방식의 한 방법인, 고조파 주입 PWM기법을 이용해 전원측으로부터 들어오는 고조파 성분들을 억제하였다.

#### 2. 3상 부스트 정류기의 분석

##### 2.1 입력 고조파 전류

입력측 고조파 전류는 여과없이 출력측으로 출력되게 되고, 이를 제거하기 위해 필터를 설치할 경우 입력측에 3상 부스트정류기보다 큰 필터를 필요로 하기 때문에 시스템의 효율과 신뢰성면에서 좋지 못하다.

입력측에서 발생하는 고조파중에서 제 5고조파가 다른 고조파보다 크기 때문에 이를 중점적으로 억제하는 것이 중요하다. 그림. 1은 제 5고조파를 고려한 입력 전류의 왜곡을 나타내는데, 식 (1)과 같이 표현되는 전압 이득 M이 큰 경우에 전류 왜곡이 작다.[4]

$$M = \frac{V_0}{\sqrt{3}V_s} \quad (1)$$

여기서,  $V_0$ : 출력전압,  $V_s$ : 입력 상전압 피크치

3상 부스트 정류기에서, 전류 왜곡을 줄이기 위해서는 부스트 인덕터에 저장되는 모드를 길게하고, 방전되는 모드를 짧게하여 전류의 불연속을 줄이는 방법이 사용된다. 따라서 시비율이 커지고, 총 고조파 왜곡은 작아지게 된다. 즉, 전압이득 M이 클수록 입력 전류 왜곡이 작아진다. 그래서, 총 고조파 왜곡을 고려하여 3상 부스트 정류기의 전압이득을 가급적 크게 사용해왔다.[4, 5]

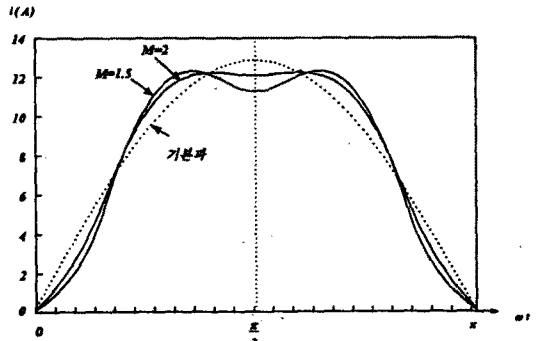


그림. 1 M=1.5, 2일때의 입력 전류

3상 부스트 정류기의 3상 전압이 다음과 같을 때,

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \sin(\omega t) \\ V_b &= V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c &= V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

A상의 전류는 각 구간마다 다음과 같이 계산된다.[2]

$$\begin{aligned} 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} & \quad i_a = \frac{V_o T_{on}}{2LT_{sw}} \frac{\sin(\omega t)}{\sqrt{3M - 3\sin(\omega t)}} \\ \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} & \quad i_a = \frac{V_o T_{on}^2}{2LT_{sw}} \frac{M \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t - \frac{2\pi}{3})}{[\sqrt{3M - 3\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})}][M - \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})]} \\ \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} & \quad i_a = \frac{V_o T_{on}^2}{2LT_{sw}} \frac{M \sin(\omega t) + \sin(2\omega t + \frac{\pi}{3})}{2LT_{sw} [\sqrt{3M + 3\sin(\omega t + \frac{\pi}{3})}][M - \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})]} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, L: 부스트 인덕터,  $V_0$ : 출력 전압,  $T_{on} = DT_{sw}$ , D: 시비율,  $T_{sw}$ : 스위칭 주기, M: 정류기 전압이득

3상 부스트 정류기의 총 고조파 왜곡(THD)은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{i_1} \quad (4)$$

### 2.2 이전의 고조파 억제 방법

부스트 스위치의 스위칭방법은 일정 주파수 스위칭과 가변 주파수 스위칭이 사용되고 있는데 일정 주파수 스위칭의 경우 각각의 상전류는 스위치가 on에서 off로 바뀌는 순간에 각 상전압에 비례하여 피크치에 도달한다. 그리고 나서 상전류는 선형적으로 감소한다. 따라서, 부하에 따라 스위칭의 한주기가 끝나기 전에 상전류가 0이 되어 불연속구간이 생길 수 있다.

그림. 2의 3상 부스트 정류기의 스위치는 일정주파수 스위칭으로 동작하고, 출력 전압이 전압보상기에서 기준 전압과 비교되어 시비율이 결정된다.

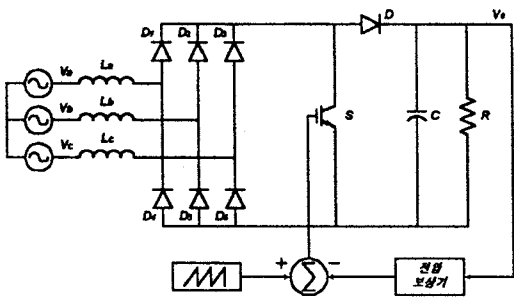


그림 2. 일반적인 3상 부스트 정류기

이 3상 부스트 정류기는 부하의 변화에 따라 불연속 모드로 동작할 수 있고, 3상 전류는 스위칭 주기가 끝나기 전에 0이 되고, 스위치가 on 되었을 때 각각의 상전압에 비례하여 선형적으로 증가한다. [2] 따라서 이러한 불연속 모드로 인한 고조파 발생을 피하기 위해 두가지 방법이 사용되고 있다.

첫번째 방법은 3상 부스트 정류기를 연속 전류모드와 불연속 전류모드의 경계사이에서 동작시켜, 전류왜곡을 줄이는 방법이고, 두번째 방법은 입력측에 전류센서를 달아 전류가 0이 되는 순간, 스위치를 on시켜 불연속 모드가 생기지 않도록 하고, 시비율은 부하에 의해 조절되는 가변 주파수 스위칭 방법이다 [2]. 첫번째 방법은 전압이득 M을 항상 크게 해주어야 하는 단점이 있고, 두번째 방법은 매우 빠른 제어를 필요로 한다. 경부하의 경우에 스위칭 주파수가 증가하게 되고, 중부하의 경우 감소하게 되기 때문에, 스위칭 손실이 크고 다른 디바이스를 제작할 경우에 이러한 점을 고려해 주어야 한다.

### 3. 고조파 주입법을 이용한 고조파 저감

#### 3.1 동작 원리

고조파 주입법은 스위치를 일정 주파수 스위칭을 하고 시비율에 제 6고조파를 주입하는 방법이다. 그림. 3은 3상 부스트 정류기에 고조파 주입법을 사용하여 입력 고조파 전류를 줄이는 회로를 보여주고 있다. 전압보상기는 출력전압을 기준전압과 비교하여 시비율, D를 결정하게 된다. 고조파 발생기는 전원측에서 3상 전압을 추출하여, 제 6고조파를 발생시킨다. 이 6고조파는 mD와 곱해지고, 다시 D와 합해진 후, PWM하게 된다.

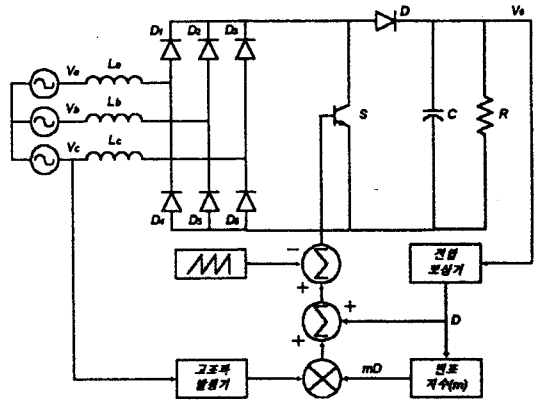


그림. 3 고조파 주입법을 사용한 Single-Switch Three-Phase Boost Rectifier

#### 3.2 시비율 변조

일정 주파수 스위칭을 하는 3상 부스트 정류기의 입력전류는 식 (3)과 같이 시비율의 제곱에 비례하여 변화한다. 따라서 시비율 변조는 전류 왜곡과 불연속 모드에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 그림. 4는 이러한 점을 이용한 3상 부스트 정류기의 시비율 변조 기본 개념을 설명하고 있다.  $i_b$ 와  $i_c$ 는 각각 B와 C상에 흐르는 전류이다. (0, a) 구간에서 시비율을 감소시키면,  $i_b$ ,  $i_c$ 는 각각  $i_{bf}$ 와  $i_{cf}$ 에 근접해진다. 반면에  $i_a$ 는 A상을 흐르는 전류이고 시비율을 감소시키면  $i_a$ 의 왜곡은 더욱 심해진다. B상과 C상의 전류 왜곡은 향상되고, A상의 전류왜곡은 악화되기 때문에, 결과적으로는 3상 입력전류 왜곡은 향상된다.

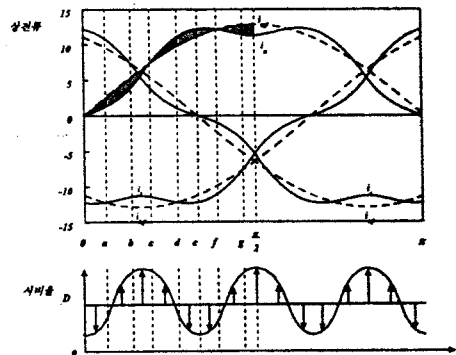


그림. 4 고조파 주입을 위한 시비율 변조 개념

시비율 변조는 일정 주파수 스위칭을 하고, 제 6고조파 주입을 위한 시비율은 식 (5)와 같다.

$$d(t) = D \left[ 1 + m \sin \left( 6\omega t + \frac{3\pi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

여기서 m (0 < m < 1)은 변조지수이다.

#### 3.3 변조 지수 m

3상 부스트 정류기의 입력전류의 왜곡은 고조파로 인

하여 야기되고, 그중에서도 제 5고조파가 크고, 제 7고조파나 그외의 고조파는 크게 중요치 않다. 따라서, 기본파와 제 5고조파만을 고려하면, 입력 전류는 식(6)과 같이 간략하게 표현된다.

$$\begin{aligned} i_a &= I_1 \sin \omega t + I_5 \sin(5\omega t + \pi) \\ i_b &= I_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_5 \sin(5\omega t - \frac{\pi}{3}) \\ i_c &= I_1 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + I_5 \sin(5\omega t + \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \quad (6)$$

$I_1$  과  $I_5$ 는 식 (3)에서 보는 바와 같이 시비율의 제곱  $D^2$ 에 비례하기 때문에 A상의 전류는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$i_a = A_1 D^2 \sin \omega t + A_5 D^2 \sin(5\omega t + \pi) \quad (7)$$

여기서,  $A_1, A_5$ 는  $V_0, L, f$ 의 함수이다.

$D$ 에 식(5)를 대입하면 고조파를 주입한 각 상의 전류를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_a &= (I_1 - mI_5) \sin \omega t + (I_5 - mI_1) \sin(5\omega t + \pi) - mI_1 \sin 7\omega t \\ i_b &= (I_1 - mI_5) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + (I_5 - mI_1) \sin(5\omega t - \frac{\pi}{3}) - mI_1 \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c &= (I_1 - mI_5) \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + (I_5 - mI_1) \sin(5\omega t + \frac{\pi}{3}) - mI_1 \sin(7\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 보는 바와 같이 고조파 주입을 하는 경우, 변조 지수  $m$ 을 조절하여 전류 왜곡을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

Pspice을 이용해 시뮬레이션을 한 결과 제 5고조파 및 제 11, 13 고조파가 감소됨을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 변수는 다음과 같다.

- ◆ 출력 전력: 24[kW]
- ◆ 출력 전압: 1[kV]
- ◆ 입력 전압: 220[V]
- ◆ 인덕터: 45[μH]
- ◆ 평활 캐패시터: 1000[μF]
- ◆ 스위칭 주파수: 25[kHz]

그림 5는 3상 부스트 정류기의 3상 전원을 추출해 고조파 발생기에 의해 발생된 제 6고조파 파형을 보여주고 있다.

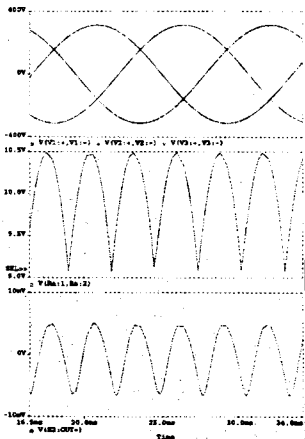
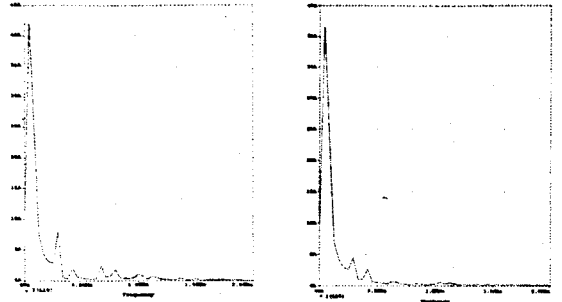


그림 5. 고조파 발생기에서 발생된 제 6고조파



(a) 고조파 주입을 하지 않은 경우 ( $m = 0$ ) (b) 고조파 주입을 한 경우 ( $m = 6.3$ )  
그림 6. 입력 전류의 주파수 스펙트럼

그림 6(a)는 고조파 주입을 하지 않은 3상 부스트 정류기의 입력전류 주파수 스펙트럼이고, 그림 6(b)는 고조파 주입을 한 경우의 입력전류 주파수 스펙트럼이다. 고주파 주입법을 사용한 그림 6(b)의 제 5고조파 전류가 그림 6(a)의 제 5고조파 전류보다 약 30% 감소되었고, 제 11, 13고조파도 감소됨을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

3상 부스트 정류기는 회로가 간결하고, 제어가 쉽기 때문에 많이 사용되고 있으나, 입력전류의 불연속 구간과 입력 고조파 전류로 인하여 IEC등의 규약에 의해 규제되고 있는 실정이고, 전체 고조파 성분중에서도 제 5고조파 성분의 억제가 무엇보다도 중요하다. 따라서, 시뮬레이션을 사용하여, 3상 정류기에서 문제가 되어 왔던 입력 고조파 전류를 제 6 고조파 주입법에 의해 감소시켜 보았고, 전체 고조파 성분도 함께 감소됨을 확인하였다. 그리고, 3상 부스트 정류기 전압이득  $M$ 을 크게하지 않고도 입력 전류 왜곡을 줄일 수 있게 되었다.

#### [참고 문헌]

- [1] A. R. Prasad, P. D. Ziogas, and S. Manias, "An Active Power Factor Correction Technique For Three Phase Diode Rectifiers", *Conference Record IEEE PESC 1989*, pp. 58-65.
- [2] D. S. L. Simonetti, J. Sebastian and J. Uceda, "Single-Switch Three-Phase Power Factor Preregulator Under Variable Switching Frequency And Discontinuous Input Current", *Conference Record IEEE PESC 1993*, pp. 657-662.
- [3] J. W. Kolar, H. Ertl, and F. C. Zach, "Space Vector-Based Analytical Analysis Of The Input Current Distortion Of A Three-Phase Discontinuous-Mode Boost Rectifier System", *Conference Record IEEE PESC 1993*, pp. 696-703.
- [4] S.Gataric, D. Boroyevich, and F. C. Lee, "Soft-Switched Single-Switch Three-Phase Rectifier With Power Factor Correction", *Conference record IEEE APEC 1994*, pp. 738-744.
- [5] M. Sedighy and F. P. Dawson, "Single-Switch Three-Phase Power Factor Correction", *Conference Record IEEE IPEC 1995*, pp. 293-297.