

## 단상 인버터로 구성된 3상 구형파 인버터의 고조파 저감기법에 관한 연구

이주훈\*, 조승연\*, 홍순찬\*, 이인환<sup>†</sup>, 황용하<sup>\*\*</sup>, 박채운<sup>\*\*\*</sup>, 한성수<sup>\*\*\*</sup>  
\* 단국대학교, \*\* (주)이티아이, <sup>†</sup> 한국철도차량주식회사

### A Study on the Harmonic Reduction Technique in Three-Phase Square-Wave Inverters Formed by Single-Phase Inverters

Ju-Hoon Lee\*, Seung-Youn Cho\*, Soon-Chan Hong\*, In-Hwan Lee<sup>†</sup>, Yong-Ha Hwang<sup>\*\*</sup>, Chae-Woon Park<sup>\*\*\*</sup>, Sung-Soo Han<sup>\*\*\*</sup>  
\*Dankook University, <sup>\*\*</sup>ETI, <sup>\*\*\*</sup>Korea Rolling Stock Co.

#### ABSTRACT

This paper deal with the harmonic reduction technique in three-phase square-wave inverter system formed by single-phase inverter. To reduce the harmonics, six single-phase inverters are used for forming multi-phase inverter and zig-zag connected output transformer for eliminating the harmonic  $6(2k-1)\pm 1$  orders. And an ac filter is furnished at output side. Computer simulations show that the THD of the output voltage can be reduced immensely.

#### 1. 서 론

인버터에서 고조파 저감을 위하여 PWM 방식이 많이 사용되나 잦은 스위칭에 의하여 스위칭 손실이 증가한다. 이 문제는 스위칭 속도가 높아지거나 용량이 커질수록 심각해진다. 대용량 인버터 시스템의 경우, 이와 같은 스위칭 손실의 증가와 스위칭 소자의 주파수 특성으로 인하여 구형파 운전이 불가피한 경우가 많다. 3상 인버터로 3상 VSI 하나를 사용하는 방법과 단상 인버터 3대를 사용하여 3상 인버터를 구성하는 방법이 있는데, 전력용량면에서는 후자가 유리하다. 단상 인버터에서 입력 직류전압이 동일한 경우, 단상 전브리지 인버터는 출력전압이 단상 반브리지 인버터에 비해 2배이므로 대전력용으로 적합하다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 단상 전브리지 인버터를 기반으로 한 3상 인버터를 사용하여 입력전압이 변동되어도 출력전압을 일정하게 제어할 수 있는 준구형파 인버터 시스템을 구성한 다음에 고조파를 저감할 수 있는 방법을 제시하고 해석하고자 한다.

#### 2. 단상 인버터를 사용한 3상 인버터 시스템

단상 전브리지 인버터에서 두 개의 스위치쌍 ( $Q_1, Q_2$ )와 ( $Q_3, Q_4$ )를  $180^\circ$ 씩 교대로 동작시키면 구형파 교류출력이 발생한다. 이때의 출력전압은 입력전압의 변동에 따라 같이 변한다. 따라서 입력전압이 변동하여도 출력전압을 일정하게 유지하려면 준구형파 운전이 요구된다. 그림 1에서와 같이 스위치  $Q_1$ 과  $Q_4$ 에  $\beta$ 만큼 앞서게 스위칭 신호를 가하고  $Q_2$ 와  $Q_3$ 에  $\beta$ 만큼 뒤지게 스위칭 신호를 가하면 준구형파 출력이 발생된다. 출력전압  $v_{ab}$ 를 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같이 홀수차 고조파만 존재한다.

$$v_{ab} = \sum_n^{\text{odd}} \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \sin n\omega t \quad (1)$$

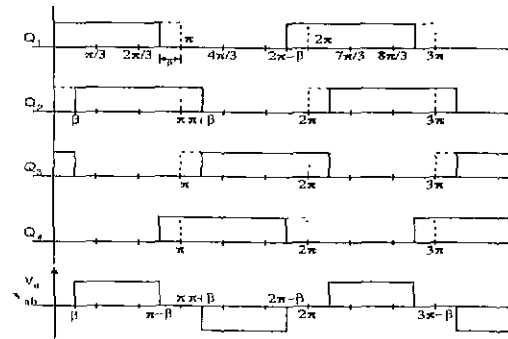


그림 1. 단상 준구형파 인버터의 게이트 신호와 출력전압  
Fig. 1. Gating signals and output voltage of a single-phase quasi-square-wave inverter.

단상 인버터의 출력단에 변압기를 설치하여 일반적인 방법으로 3상 인버터를 구성했을 때, 변압기의 권수비를  $N$ 이라 하면 상전압  $u_{RN}$ 이 다음과 같으며 여전히 모든 홀수 차수의 고조파가 존재한다.

$$u_{RN} = \sum_n^{\text{odd}} \frac{4NV_d}{n\pi} \cos n\beta \sin n\omega t \quad (2)$$

### 3. 고조파 저감을 위한 시스템 구성

고조파를 저감하기 위하여 지그재그 결선된 출력 변압기를 사용하고 3상 인버터를 2중화한 후에 교류 필터를 설치한다.

#### 3.1 지그재그 결선 출력변압기

먼저 3의 배수 고조파를 제거하기 위하여 3상 인버터의 출력단에 그림 2와 같은 출력변압기를 설치한다.

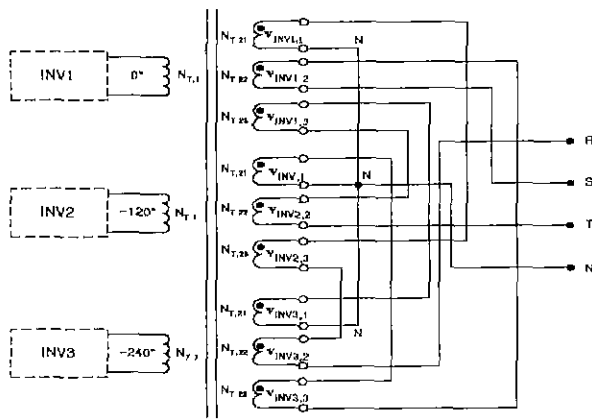


그림 2. 출력 변압기의 결선도

Fig. 2. Connection of output transformer.

출력전압은 3개의 단상 인버터 출력전압으로 구성되며, 변압기의 권수비를 위로부터  $N_1, N_2, N_3$ 라 하면 상전압  $v_{RN}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left\{ N_1 \sin n\omega t - N_3 \sin n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - N_2 \sin n\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (3)$$

출력전압  $v_{RN}$ 에서 고조파 성분이 적고 기본파 성분을 크게 하기 위해서는 그림 3의  $v_{RN}$  파형이 반파 및 정현대칭이어야 하며,  $v_{RN}$ 의 위상이  $v_{INV1,1}$ 과 동상이려면  $N_2 = N_3$ 이어야 한다. 따라서  $N_2 = N_3 = N_a$ 라 놓고 정리하면 출력전압  $v_{RN}$ 은

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( N_1 + 2N_a \cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n\omega t \quad (4)$$

이다. 이 식에서  $n=3$ 일 때 괄호 속의 값이 0이 되면 3차 고조파가 제거된다. 따라서 권수비 사이에

$$N_a = \frac{1}{2} N_1 \quad (5)$$

의 관계가 성립하면 3차 고조파가 제거되며 출력전압  $v_{RN}$ 은 다음과 같이 정리된다.

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( 1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right) N_1 \sin n\omega t \quad (6)$$

식 (6)에서  $n$ 이 3의 배수이면  $n$ 이 홀수이므로 항상

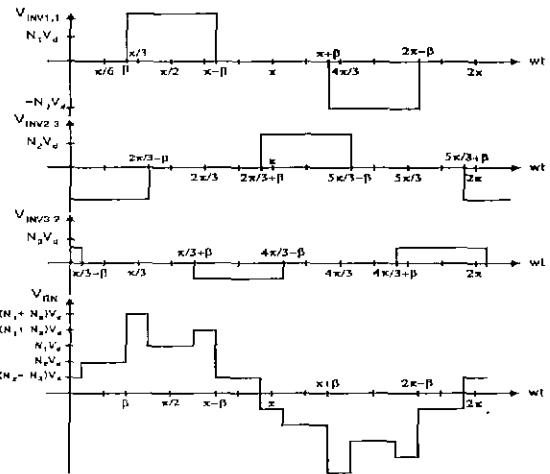


그림 3. 출력변압기의 전압 파형

Fig. 3. Voltage waveforms of output transformer.

$\{1 + \cos(n\pi/3)\} = 0$ 이 성립하여 모든 3의 배수차 고조파가 제거된다. 따라서 존재하는 고조파는  $(6k \pm 1)$ 차이고 최저 고조파의 차수는 5차이다.

#### 3.2 출력변압기를 사용한 인버터의 2중화

3상 구형파 인버터를 다중화하면 인버터의 출력을 정현파에 가깝도록 할 수 있으며, 고조파 발생을 억제할 수 있어서 고조파 저감 특성이 매우 우수해진다. 또한 이 방식은 고조파 대역이 이동하는 다중펄스 PWM기법과는 달리 저차 고조파를 제거하여도 고차 고조파가 증가하지 않는 장점이 있다. 그리고 복수개의 인버터를 사용하기 때문에 대용량일 경우 인버터 개개의 용량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

그림 4는 출력변압기를 사용하여 인버터를 2중화한 시스템이다. 단상 전브리지 인버터로 구성된 2대의 3상 인버터 INV#1과 INV#2는 직렬 리액터를 거쳐 변압기의 1차측에 연결된다. 그림 4에서 INV#1은 그림 2의 인버터이고 INV#2는 INV#1과 30°의 위상차를 가지며, 출력변압기 T1, T2는 2차측 결선 형태가 서로 다르다.

R상의 전압  $v_{RN}$ 은  $v_{RN} = v_{INV1,1} - v_{INV2,3} - v_{INV3,2} + v_{INV4,2} - v_{INV5,1}$ 과 같이 5개의 전압으로 표시된다.  $v_{RN}$ 과 이를 구성하는 5개의 단상 인버터 출력전압의 벡터도를 그림 5에 나타내었다.

인버터의 입력 직류전압이  $V_d$ 이고 T2의 권수비를 위로부터  $N_4, N_5$ 라 하면  $v_{RN}$ 은 다음과 같다.

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left\{ N_1 \sin n\omega t - N_3 \sin n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - N_2 \sin n\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + N_5 \sin n\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - N_4 \sin n\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \right\} \quad (7)$$

출력전압  $v_{RN}$ 이 고조파 성분이 적고 기본파 성분을 크게 하면서 출력변압기의 1차측 전압  $v_{INV1,1}$ 과 동상이 되려면  $N_2 = N_3, N_4 = N_5$ 이어야 하며, 이 조

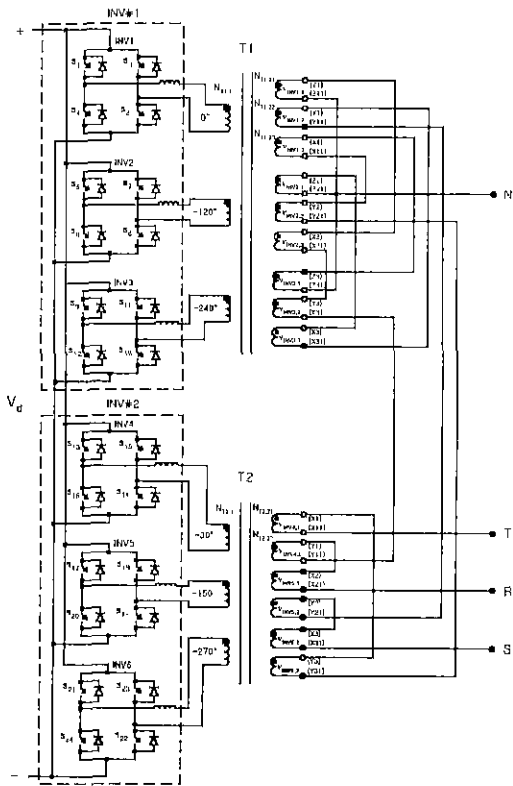


그림 4. 출력변압기를 사용한 2중화 인버터 시스템  
Fig. 4. Duplicated inverter system using zig-zag connected output transformer.

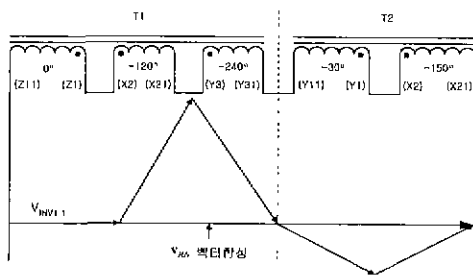


그림 5. 출력전압 벡터도  
Fig. 5. Vector diagram of output voltage.

건이 성립될 때의 출력전압은 그림 6과 같다.

여기서  $N_2 = N_3 = N_a$ ,  $N_4 = N_5 = N_b$ 라 놓으면  $v_{RN}$ 은

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( N_1 + 2N_a \cos \frac{n\pi}{3} + 2N_b \cos \frac{n\pi}{6} \right) \sin n\omega t \quad (8)$$

이다. 식 (8)에서  $n$ 차 고조파 전압의 크기  $V_n$ 은

$$V_n = \left| \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( N_1 + 2N_a \cos \frac{n\pi}{3} + 2N_b \cos \frac{n\pi}{6} \right) \right| \quad (9)$$

이다. 식 (9)에서  $n$ 이 3의 홀수차 배수일 때 팔호속의 값이 0이려면 다음의 관계가 성립되어야 한다.

$$N_a = \frac{1}{2} N_1 \quad (10)$$

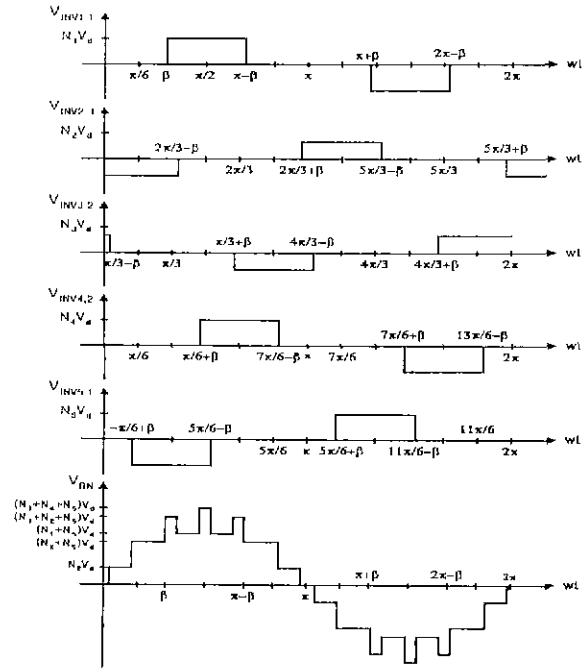


그림 6. 2중화 인버터 시스템의 출력전압  
Fig. 6. Output voltage of duplicated inverter system.

이 관계식은 식(5)와 일치하며 따라서 식(10)이 성립하면 2중 인버터에서도 3의 배수차 고조파를 제거하여  $(6k \pm 1)$ 차의 고조파만 남는다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면

$$V_n = \left| \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( \left( 1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right) N_1 + 2N_b \cos \frac{n\pi}{6} \right) \right| \quad (11)$$

이다. 존재하는 고조파중 최저 차수인 5차를 제거하려면  $n$ 이 5일 때 식 (11)의 괄호속이 0 이어야 하며, 이로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$N_b = \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 \quad (12)$$

식 (10)과 식 (12)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 출력전압  $v_{RN}$ 은 다음과 같다.

$$v_{RN} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos n\beta \left( 1 + \cos \frac{n\pi}{3} + \sqrt{3} \cos \frac{n\pi}{6} \right) N_1 \sin n\omega t \quad (13)$$

식(13)에서  $n$ 이  $6(2k-1) \pm 1$ 일 때에도 괄호속의 값이 0이 되므로 출력전압  $v_{RN}$ 에 존재하는 고조파의 차수는  $(12k \pm 1)$ 차이다.

### 3.3 교류필터

지그재그 결선 변압기를 사용한 인버터의 2중화로 고조파를 제거하면 존재하는 고조파는 11차 고조파, 13차 고조파 및 이것에 12의 배수를 더한 차수만 남게 된다.

잔존하는 고조파는 인덕터와 커패시터로 구성된 수동필터를 사용하면 고조파량을 더 저감시킬 수 있다. 교류필터는 특정 차수의 한 고조파만을 제거할

수 있기 때문에 여러 고조파를 제거하려면 그 수만큼의 교류필터가 필요하게 되는 단점이 있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 분석

직류 입력전압 1,700V, 교류 출력전압 480V, 준구형파 생성을 위한  $\beta$ 가  $50^\circ$ 인 조건하에서 Simplorer를 사용하여 시뮬레이션하였다.

그림 4의 회로에서 윗부분에 있는 3상 인버터 1대의 출력 전압파형은 그림 7과 같으며 INV#1과 INV#2를  $30^\circ$ 의 위상차로 이중화한 후의 출력 상전압파형은 그림 8과 같다.

인버터를 이중화하기 전의 출력 상전압과 이중화한 후의 출력 상전압으로 고조파를 분석하였다. 이중화하기 전의 고조파 분석결과는 표 1에서와 같이 지그재그 결선 변압기의 사용으로 3의 배수차 고조파가 제거되었음을 알 수 있다. 그러나 THD가 31.31%로 높은 편이다. 이중화한 후에는 THD가 16.74%로 대폭 낮아졌으며  $2(6k-1)\pm 1$ 차의 고조파가 제거되었음을 알 수 있다.

현존하는 최저 차수의 11차 고조파를 제거시키기 위하여 11차 교류필터를 설치했을 때의 고조파 분석결과를 표 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 11차 교류필터로 인하여 11차 고조파를 포함하여 각 고조파의 크기가 대폭 작아졌으며 THD도 1.66%로 낮아져 관련 국제규격의 요건을 양호하게 만족한다.

전력용량이 큰 대전력 시스템에서는 현실적으로

여러 개의 교류필터를 부착하기 어렵다. 표 1에 12차 교류필터만을 설치한 경우와 13차 교류필터만을 설치한 경우의 고조파 분석결과를 11차 교류필터만을 부착한 경우의 고조파 분석결과와 비교하였다. 이 결과로부터 12차 교류필터를 사용한 경우가 THD가 1.62%로 가장 낮음을 알 수 있다.

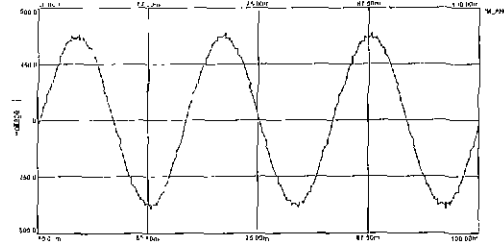


그림 9. 교류필터 설치후의 출력 상전압  
Fig. 9. Output voltage with an AC filter.

표 1. 고조파 분석결과(%)

Table 1. Harmonic analysis.

고조파 차수	인버터를 이중화하기 전	인버터를 이중화한 후			
		교류필터 미설치	11차 필터 설치시	12차 필터 설치시	13차 필터 설치시
1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
5	10.64	0	0	0	0
7	21.92	0	0	0	0
11	13.87	13.93	0.13	0.82	1.28
13	4.08	4.05	0.29	0.22	0.03
17	5.82	0	0	0	0
19	5.31	0	0	0	0
23	2.32	2.35	0.41	0.39	0.28
25	6.17	6.11	1.16	0.93	0.81
29	5.23	0	0	0	0
31	1.70	0	0	0	0
35	2.80	2.81	0.57	0.52	0.42
37	2.75	2.73	0.56	0.51	0.41
41	1.30	0	0	0	0
43	3.60	0	0	0	0
47	3.20	2.56	0.70	0.58	0.53
49	1.07	1.04	0.22	0.21	0.16
THD	31.31%	16.74%	1.66%	1.62%	1.74%

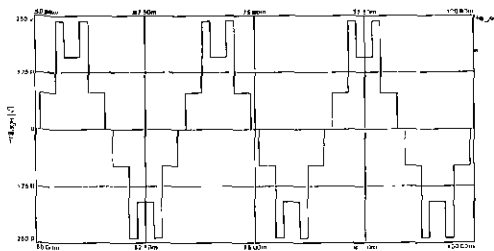


그림 7. 3상 인버터의 출력 상전압  
Fig. 7. Phase voltage of a three-phase inverter.

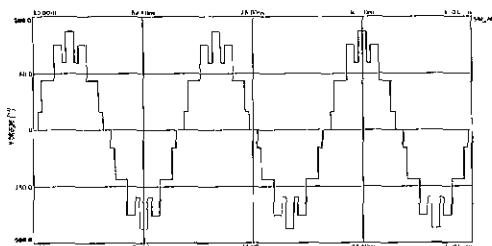


그림 8. 이중화한 후의 출력 상전압  
Fig. 8. Output voltage after duplication.

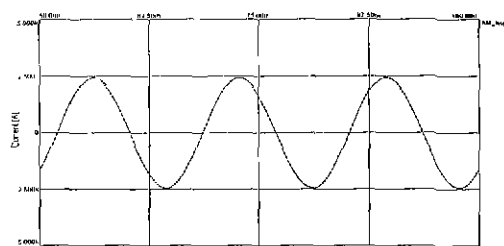


그림 10. 교류필터 설치후의 출력 전류  
Fig. 10. Output current with an AC filter.

12차 교류필터를 설치한 후의 출력 상전압 파형은 그림 9와 같으며 이 전압이 시스템에서 Y부하에 인가되는 전압이다. 그림 10은 이때 Y결선된 부하에 흐르는 전류이며 거의 정현파임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 단상 인버터로 구성된 3상 인버터를 사용하여 전압을 제어할 수 있고 고조파를 저감시킬 수 있는 준구형파 인버터 시스템을 구성하고 고조파를 분석하였다.

먼저 지그재그 결선된 출력변압기를 사용하여 3의 배수 고조파를 제거하고 2대의 3상 인버터를 30°의 위상차로 이중화하여  $6(2k-1) \pm 1$ 차의 고조파를 제거하였다. 또한 출력단에 11차 교류필터 대신에 12차 필터를 설치하여 THD를 대폭 저감시켰다.

단상 인버터로 3상 인버터를 구성하면 각 상의 전압이 독자적으로 형성되고 대용량화에 유리하며 유지

보수면에서 편리하다. 또한 준구형파 운전으로 전압의 크기 제어가 가능하므로 다양한 용도의 대전력 인버터 시스템에 활용이 가능하다.

본 연구는 에너지자원기술개발지원센터가 지원하고 한국철도차량주식회사가 주관하는 에너지 절약기술 개발사업의 연구결과중 일부임.

## 참 고 문 헌

- [1] P.T. Cheng, S. Bhattacharya, and D. D. Divan, "Line Harmonics Reduction in High-Power Systems Using Square-Wave Inverters - Based Dominant Harmonic Active Filter". IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 12, No. 2, March 1999.
- [2] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics*, Prentice Hall, 1993.