

직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구

김명수* · 윤인식* · 박영진** · 윤덕용*** · 홍순찬*

단국대학교* · 원주대학교** · 천안공업대학교***

A Study on Harmonic Reduction in Inverters for DC Power Regeneration

Myeong-Soo Kim* · In-Sic Yoon* · Young-Jeen Park** · Duck-Yong Yoon*** · Soon-Chan Hong*

Dankook University* · Wonju National College** · Chonan National Technical College***

Abstract

This paper deals with the harmonic reduction technique in square-wave inverters which can regenerate the dc power from dc bus line to ac bus line in substations for traction systems. To reduce the harmonics, two 6-pulse inverters are used for 12-pulse operation and zigzag-connected output transformers for eliminating the harmonics of $6(2m-1)\pm 1$ orders. And an ac filter is furnished at output side. In spite of the square-wave three-phase inverters, computer simulations show that the THDs of the output voltage and current are 2.55% and 0.554%, respectively.

1. 서론

직류를 전원으로 하는 전동차 시스템에서 제동시나 하강 경사로 주행시에 회생되는 에너지를 급전시스템으로 회생하는 연구는 에너지의 효율적인 이용 측면에서 매우 중요하다. 이때 회생되는 에너지량은 정류기에서 전동차에 공급하는 에너지량의 10~20% 정도인데 전철시스템의 전력소비량을 감안하면 절감되는 에너지의 양이 대단히 크다.

에너지를 회생시키면 불필요한 에너지의 소모를 방지할 수 있어서 전철 시스템의 효율을 높일 수 있다. 이러한 회생제동시스템은 하강 경사로 구간이 길거나 전철역 사이의 간격이 짧을 때 효과적이며 지하철의 경우에 더 유용하다. 회생제동을 사용하지 않거나 직류모선 과전압 방지를 위해 저항을 사용할 경우에 발생하는 에너지는 지하구간의 내부온도를 상승시킨다. 이에 따라 전철역 구내 또는 전동차의 냉각에 필요한

에너지가 증가하여 공조설비의 대형화, 냉각용 전력의 증가를 초래한다. 이러한 간접적인 에너지 절감효과를 고려한다면 직류전력 회생용 인버터의 필요성은 더 높아진다.

직류전력을 교류 모선으로 회생시키는데 있어서 가장 큰 문제점은 회생되는 전력이 많은 고조파를 함유하고 있어 전력의 질을 떨어뜨리는데 있다. 본 연구에서는 기존의 정류기 시스템에 부가, 설치하여 직류전력을 회생할 수 있는 인버터 시스템을 연구대상으로 하여 고조파를 분석하고 고조파 저감기법을 제시하고자 한다.

2. 직류전력 회생용 인버터 시스템

그림 1은 직류전력을 교류모선으로 회생시키는 전철시스템의 개념도이다. 전동차가 정상운전시에는 교류전원에서 공급된 전력이 다이오드 정류기를 통해 정류된 다음에 전동차에 전력이 공급된다. 전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행시에 직류모선으로 전력이 회생되면 직류모선의 전압이 상승한다. 이때의 잉여전력이 회생용 인버터를 통해 교류모선으로 되돌려지며, 이 전력은 보조설비나 다른 구간의 전동차에 공급된다.

전철시스템에 전력을 공급하는 교류모선은 교류 22,900[V]의 수전선로이며, 다이오드 정류기를 거친 후의 무부하 직류전압은 직류 1,593[V]이다.

전동차에 전력을 공급하는 직류모선 1구간의 길이는 대략 3~4km이며 한 변전소가 2구간의 직류모선을 담당하고 있다. 변전소에는 3대의 다이오드 정류기가 설치되어 있는데 2대는 각각 1구간의 직류모선을 담당하며 나머지 1대의 정류기는 예비용이다. 직

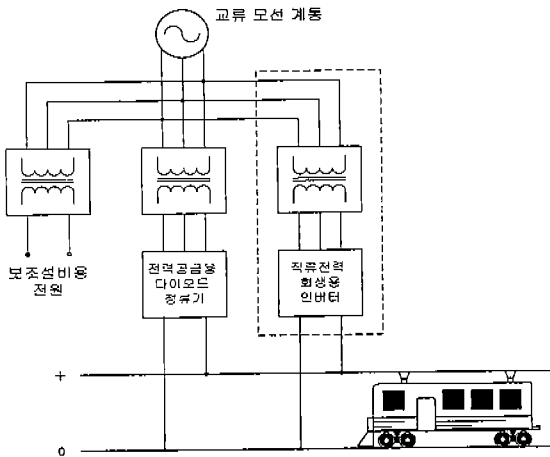


그림 1. 회생용 인버터를 사용한 전철시스템

류모선의 기준전압은 직류 1,500[V]이지만 전동차가 운행되는 동작범위는 1,000~1,800[V] 범위이다.

정류기 및 회생용 인버터를 겸용하는 시스템에 의해 에너지를 회생시킬 수 있으나 다음과 같은 이유로 회생용 인버터를 별도로 설치하는 것이 유리하다. 교류모선에서 정류기를 통해 직류모선에 공급되는 전력에 비해 직류모선에서 인버터를 통해 교류모선으로 회생되는 전력이 작다. 일반적으로 경사로 구간이 많은 전철 시스템에서는 (인버터 용량)/(정류기 용량)의 비율이 1/3정도이며 평탄한 구간만 있는 전철 시스템에서는 7~13%정도이면 된다. [1]

회생전력의 고조파를 저감시키는 방법으로는 다중 펄스 PWM기법을 이용하는 방법과 구형파 인버터를 기본으로 하여 고조파를 저감시키는 PWM기법을 접목하는 방법이 있다. 고조파 저감만을 고려한다면 PWM방법이 보다 더 효과적이거나 전철시스템이 대용량을 감안한다면 빈번한 스위칭으로 인한 스위칭 손실을 무시할 수 없게 된다.

직류전력 회생용 인버터를 전력공급용 다이오드 정류기와 별도로 설치하면 용량이 작아도 되므로 SCR과 같은 사이리스터 외에도 IGBT와 같은 전력용 트랜지스터도 사용할 수 있다. 사이리스터는 전력용 트랜지스터에 비해 용량면에서는 유리하지만 자체적으로 턴오프의 기능이 없으므로 전환실패의 가능성이 높다. 본 연구에서는 스위칭 손실이 적은 구형파 인버터를 기본으로 하고, 자체적으로 턴오프가 가능한 IGBT를 스위칭소자로 사용한 삼상 인버터를 대상으로 한다.

3. 고조파 저감을 위한 시스템 구성

3상 구형파 인버터(그림 2의 윗부분 인버터 참조)를 180° 도통방식으로 운전하려면 각 스위칭 소자

Q₁₁~Q₁₆에 60°씩의 위상차를 두고 180° 동안 게이트 신호를 인가하면 된다. 인버터의 전원전압을 V_s라 하고 ωt=0일 때 Q₁₁의 게이트에 신호를 가하면 출력의 선간전압은 다음과 같다.

$$v_{AB} = \sum_n \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad (1)$$

n이 홀수이므로 n이 3의 배수가 되면 cos(nπ/6)=0가 되어 존재하는 고조파의 차수는 (6m±1)차이다.

3.1 인버터의 2중화

6스텝 인버터의 THD는 30%가 넘으며 고조파를 저감시키기 위하여 다중화 기법을 많이 사용하는데 [2] 본 연구에서는 두 대의 인버터를 사용한 2중화 기법을 고려한다.

그림 2의 아래부분 인버터에서 ωt=π/6일 때 Q₂₁의 게이트에 신호를 가하고 180° 도통방식으로 운전하면 출력의 선간전압은 다음과 같다.

$$v_{ab} = \sum_n \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n\omega t \quad (2)$$

단, n = 6m ± 1

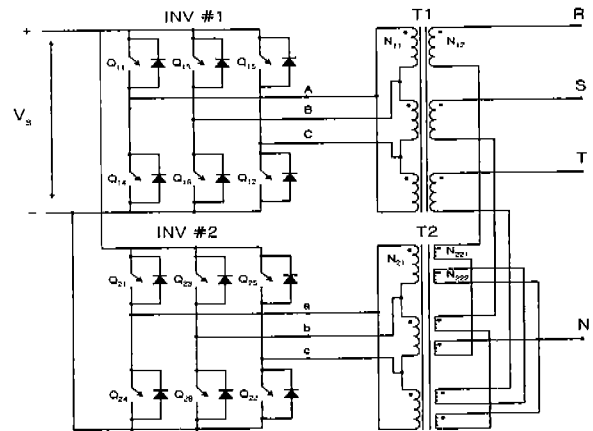


그림 2. 회생 인버터의 회로도

그림 2의 두 인버터에서 출력단에 1:1 변압기를 사용하고 그 2차측을 직렬 접속하면 출력전압이 다음과 같다

$$\begin{aligned} v_A &= v_{AB} + v_{ab} \\ &= \sum_n \frac{8V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \cos \frac{n\pi}{12} \sin n(\omega t + \frac{\pi}{12}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 THD를 구해보면 식 (1) 또는 식 (2)에서의 THD보다 낮다. 그러나 n이 홀수이므로 항상 cos(nπ/12)≠0이어서 존재하는 고조파의 차수는 (6m±1)차로서 6스텝 인버터의 경우와 같다.

인버터를 2중화하면 고조파를 저감시키는 효과 외에 단위 인버터의 용량을 줄일 수 있으므로 제작에 유리하다.

3.2 지그재그 결선 변압기의 사용

인버터를 2중화하여도 존재하는 고조파의 차수가 $(6m \pm 1)$ 차이므로 고조파의 최저 차수는 5차이다. 인버터의 출력변압기 2차측을 지그재그로 결선하면 저차 고조파인 5고조파를 없앨 수 있다. 그림 3은 지그재그 결선 변압기를 사용했을 때의 출력전압 V_R 을 나타내는 벡터도이다. 그림에서와 같이 각 상의 방향을 원래대로 유지하기 위해서는 $N_{221} = N_{222} = N_{22}$ 이어야 한다.

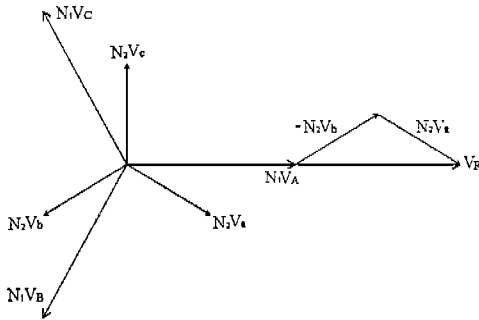


그림 3. 지그재그 결선 변압기 사용시의 벡터도

두 변압기에서 $N_{12}/N_{11} \approx N_1$, $N_{22}/N_{21} \approx N_1$ 이라 하면 지그재그 결선 변압기를 사용했을 때의 출력전압 V_R 은 그림 4와 같다. 그림 4의 출력전압 V_R 을 푸리에 급수로 전개하여 n 차 고조파의 크기를 구하면 다음과 같다.

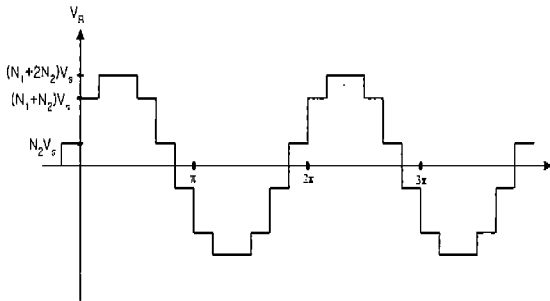


그림 4. 지그재그 결선 변압기 사용시의 출력전압

$$V_n = \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \left\{ N_1 + N_2 \left(2 \cos \frac{n\pi}{6} \right) \right\} \quad (4)$$

최저 차수인 5차 고조파를 없애려면 식(4)에서

$$N_1 + N_2 \left(2 \cos \frac{5\pi}{6} \right) = 0 \quad (5)$$

가 성립하면 된다. 식 (5)에서 N_1 과 N_2 의 관계를 구하면 $N_1 = \sqrt{3}N_2$ 이다.

$N_1 = \sqrt{3}N_2$ 의 관계를 식 (4)에 대입하면

$$V_n = \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} N_2 \left(\sqrt{3} + 2 \cos \frac{n\pi}{6} \right) \quad (6)$$

가 되어

$$\cos \frac{n\pi}{6} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

이 성립하면 $V_n = 0$ 이 된다. 식 (7)을 만족하는 n 값은 $6(2m-1) \pm 1$ 이다. 따라서 $N_1 = \sqrt{3}N_2$ 의 관계를 만족하면서 지그재그로 결선하면 $(12m \pm 1)$ 차의 고조파만 남게되어 존재하는 고조파의 최저 차수는 11차가 된다.

3.3 교류필터의 사용

지그재그 결선 변압기를 사용하면 $(12m \pm 1)$ 차의 고조파가 존재하며, 차수가 낮은 고조파일수록 그 크기가 크다. 이때 저차 고조파를 제거할 수 있는 교류필터를 부착하면 고조파를 더 저감시킬 수 있다. 교류필터는 제거하고자 하는 고조파의 수만큼 설치하여야 하지만 여러 개의 교류필터의 설치는 현실적으로 어려움이 있다.

4. 시뮬레이션

그림 5는 디지털 시뮬레이션을 하기 위한 직류전력 회생용 인버터 시스템을 나타내고 있다. 인버터의 직류입력단에는 LC필터를 설치하였고 인버터와 출력변압기 사이에 직렬리액터를 설치하였다. 오른쪽 끝의 리액터는 부하인 3상 교류모선과의 연계를 위한 계통 연계 리액터이다. 교류필터로는 12차 고조파를 제거할 수 있는 수동필터를 설치하였다. 이론적으로는 11차, 13차 고조파를 제거하려면 2개의 교류필터를 설치하여야 하지만 12차 고조파 제거용 필터를 설치하여 11차 및 13차 고조파가 감소되도록 하였다.

본 연구는 prototype의 실험장치를 제작하여 실험하는 것을 전제로 하기 때문에 직류입력은 직류 600 [V], 부하가 되는 교류모선은 교류 220[V]를 전제로 하여 시뮬레이션하였다.

그림 6은 2중 인버터 사용시의 출력전압이고 그림 7은 2중 인버터의 출력변압기를 지그재그로 결선하였을 때의 출력전압이다. 또한 그림 8은 그림 7의 조건에 교류필터를 부착했을 때의 파형이다.

고조파의 양을 나타내는 파라미터로는 THD와 다음과 같이 정의되는 DF를 사용하였다.[3]

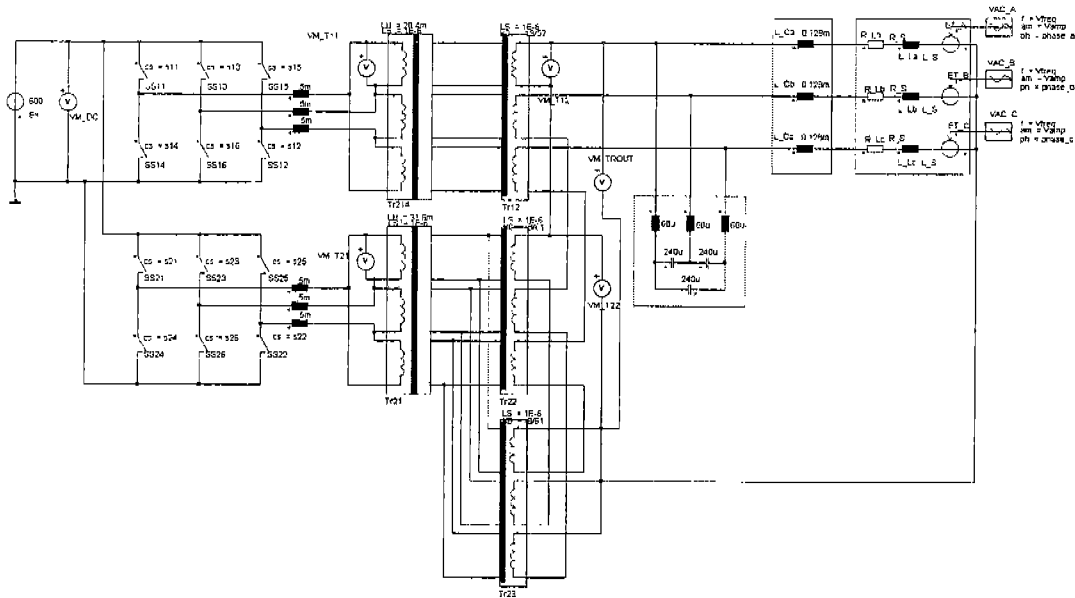


그림 5. 직류전력 회생용 인버터 시스템

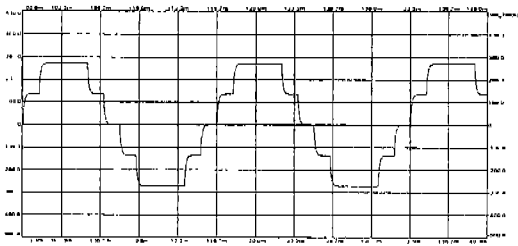


그림 6. 12펄스 인버터의 출력전압

$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2} \right)^2} \times 100 [\%] \quad (8)$$

고조파를 저감할 수 있는 3가지 기법의 고조파 분석결과는 표 1과 같다. 고조파 분석결과를 6스텝 인버터와 비교할 수 있도록 하였으며 기본파를 기준으로 하여 정규화한 값들이다. 시뮬레이션은 n=70까지 수행하였으나 표 1에는 25고조파까지만 표기하였다.

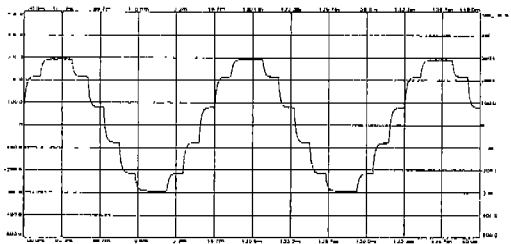


그림 7. 지그재그 결선 변압기 사용시의 출력전압

표 1. 출력전압의 고조파 분석(p.u.)

차수	6스텝인버터	2중인버터	출력변압기	교류필터
1	1	1	1	1
5	0.19984	0.054	0	0
7	0.143	0.038	0	0
11	0.091	0.091	0.084	0.126
13	0.076	0.076	0.071	0.084
17	0.058	0.016	0	0
19	0.052	0.014	0	0
23	0.043	0.043	0.040	0.011
25	0.039	0.039	0.040	0.010
THD	30.06	15.90	13.24	2.55
DF	0.856	0.245	0.082	0.012

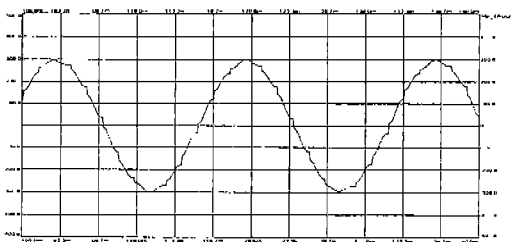


그림 8. 교류필터 추가시의 출력전압

표 1에서 고조파 저감기법이 더해질수록 THD가 감소하여 2.55[%]가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 다중펄스 PWM기법을 사용하지 않아도 국제규격에서 정하고 있는 THD<10%를 만족할 수 있다. 출력전류의 고조파 분석결과는 표 2와 같으며 THD는 0.554%로 거의 정현적이다.

표 2. 출력전류의 고조파 분석

차수	크기(p.u.)
1	1
5	0
7	0
11	0.0035
13	0.0021
17	0
19	0
23	0.0024
25	0.0022

5. 결 론

본 연구에서는 전철시스템에서 직류전력을 교류모선으로 회생시키는 인버터시스템에서 고조파를 저감시키는 기법에 대해 연구하였다. 고조파를 저감시키는 기에는 적합하지만 스위칭 회수의 증가로 인한 스위칭 손실 증대와 대전력용임을 감안하여 구형파 인버터를 대상으로 하였다.

고조파를 저감시키기 위하여 6스텝 인버터 두 대를 30°의 위상차를 두어 2중화하고 출력변압기를 지그재그로 결선하였으며 교류필터를 설치하였다. 그 결과

전압 THD를 2.55[%]까지 저감시킬 수 있었으며 전류는 THD가 0.554[%]로 거의 정현적인 파형을 얻을 수 있었다.

본 연구는 에너지자원기술개발지원센터가 지원하고 대우중공업(주)가 주관하는 에너지절약 기술개발사업의 연구결과중 일부임.

참고문헌

- [1] T. Suzuki and B. Tech, "DC Power-Supply System with Inverting Substaions for Traction Systems Using Regenerative Brakes", IEE Proceeding., Vol.129, Pt.B, No. 1, pp. 18-26, January 1982.
- [2] 유철로 외, "고조파 저감형 3상 멀티 스텝 전류원 인버터 시스템", 전기학회 논문지, 제43권, 제 11호, pp. 1866-1874, 1994.
- [3] M. H. Rashid, *Power Electronics*, Prentice-Hall, Inc., 1998.