

α 도통모드에 의한 직류전력회생용 인버터 출력전압의 크기 제어

서영민*, 이주훈*, 김경원*, 윤인식*, 유종걸**, 윤덕용***, 홍순찬*
 단국대학교 전기공학과*, 산업기술시험원**, 천안공업대학 제어계측과***

Voltage Amplitude Control of DC Power Regenerating Inverters with α -Conduction Mode

Young-Min Seo*, Ju-Hoon Lee*, Kyung-Won Kim*, In-Sic Yoon*, Jong-Gul Yoo**, Duck-Yong Yoon***, Soon-Chan Hong*
 Dankook University*, KTL**, Chonan National Technical College***

ABSTRACT

This paper deals with the voltage amplitude control in inverter systems which can regenerate the excessive DC power from DC bus line to AC supply in substations for traction systems. To maintain the magnitude of output fundamental voltage constant in spite of the variation of input DC voltage, inverters are operated in symmetrical α -conduction mode with the range of $120^\circ < \alpha < 180^\circ$. To match the output voltage of the inverter systems with AC supply voltage, harmonic reduction techniques are also investigated. Computer simulations are carried out to verify the validity of the proposed system.

1. 서 론

직류모션으로부터 전력을 공급받는 전동차 시스템에서 제동시나 하강 경사로 주행시에 회생되는 에너지를 급전시스템으로 회생하는 연구는 에너지의 효율적인 이용 측면에서 매우 중요하다.^[1]

직류전력을 교류모션으로 회생시키는데 있어서의 문제점은 전력이 회생됨에 따라 직류모션의 전압이 감소하여 일정 출력전압 유지에 문제가 있고 회생 전력에 고조파가 포함되어 있어 전력의 질을 떨어뜨리는 것이다. 따라서 직류입력이 변하더라도 출력전압을 항상 일정하게 제어하면서 고조파를 저감시킬 수 있는 제어기법이 필요하게 된다.

본 논문에서는 직류전력 회생용 IGBT 인버터를 α 도통모드로 동작시켜 직류모션의 전압이 변하더라도 인버터의 출력전압을 일정하게 제어하면서 고조파를 저감하는 기법을 제시하고자 한다.

2. 직류전력 회생용 인버터 시스템

그림 1은 직류전력을 교류모션으로 회생시키는 전철시스템의 개념도이다. 전동차에 사용되는 전동

기는 직류전동기나 유도전동기이며, 어느 경우이든지 직류모션으로부터 전력을 공급받는다.

전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행시에 직류모션으로 전력이 회생되면 직류모션의 전압이 상승한다. 이때 직류모션으로 회생된 에너지는 같은 직류구간내의 다른 전동차에서 소모된다. 그러나 동일 구간내의 직류 모션내에 주행중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접한 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모션의 전압은 점점 더 상승하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하여 직류모션의 잉여전력을 교류모션으로 회생할 수 있다. 이 인버터가 회생용 인버터이며, 인버터에 의해 회생된 에너지는 보조설비나 다른 구간의 전동차에 공급된다.

현재 국내의 전철시스템에는 회생용 인버터가 없으며 국외의 경우에는 정류 및 회생을 겸한 시스템을 일부 사용하고 있다. 이때, 정류기 및 회생용 인버터를 겸용하는 시스템에 의해 에너지를 회생시킬 수도 있으나 용량이나 유지보수 면에서 회생용 인버터를 별도로 설치하는 것이 유리하다.^[2] 그림 2는 직류전력을 회생하기 위한 인버터 시스템의 개념도이다.

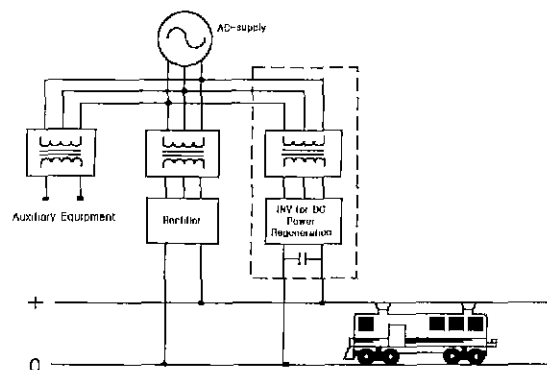


그림 1. 회생용 인버터를 사용한 전철시스템
 Fig. 1. Traction system with inverters for regeneration.

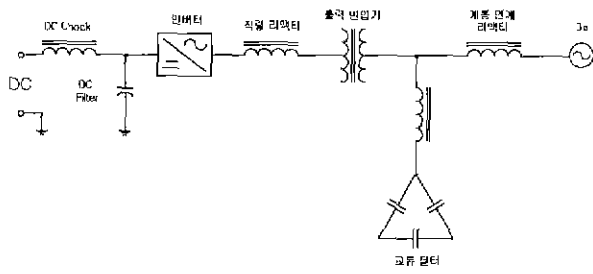


그림 2. 직류전력 회생용 인버터 시스템
Fig. 2. Inverter system for DC power regeneration.

3. 출력전압 제어

3상 구형과 VSI의 제어방식으로는 한주기 내에서 각 스위치 도통구간의 길이에 따라 180° 도통방식과 120° 도통방식이 많이 사용된다.^[3] 180° 도통방식과 120° 도통방식은 입력전압이 변동하게 되면 일정한 출력전압을 얻을 수 없다. 본 논문에서는 입력전압이 변동하더라도 출력전압을 일정하게 유지할 수 있도록 180° 도통방식과 120° 도통방식을 혼용한 α 도통방식을 제안한다.

인버터의 출력전압 크기를 제어하려면 게이트 신호의 펄스폭 α 를 $2\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$ 의 범위를 갖도록 하여야 한다. α 를 $2\pi/3$ 미만으로 하면 스위치 하나에만 게이팅 신호가 가해지는 구간이 발생하고, 이러한 구간에서는 직류전원으로부터 부하로 에너지가 전달되지 않는다. 각 스위치에서의 스위칭 신호의 폭을 α 로 제어하고자 할 때 펄스를 한쪽에서만 줄이면 기본파의 위상이 변화하므로 펄스의 양쪽에서 동일한 폭으로 줄여야 한다.

α 도통방식을 사용하기 위해서는 부하 결선방법도 중요하다. 120° 도통방식의 경우, Δ 결선시에는 3상 모두에서 에너지가 전달되지만 Y결선시에는 두개의 상에서만 에너지가 전달된다. α 도통방식을 구간별로 살펴보면 120° 도통방식과 180° 도통방식이 교대로 나타난다. 따라서 인버터 출력단에 접속하는 변압기의 1차측은 반드시 Δ 결선을 하여야 한다.

그림 3은 180° 도통방식과 120° 도통방식, α 도통방식의 펄스폭의 변화를 나타낸 것이다. 3상 준구형과 인버터를 α 도통방식으로 운전하려면 각 스위칭 소자 $Q_1 \sim Q_6$ 에 60°씩의 위상차를 두고 180° 펄스의 양쪽에서 각각 β 를 뺀 α 동안 스위칭 소자를 도통시키면 된다. 그림 4는 α 도통방식을 사용했을 때의 게이트 신호와 출력전압을 나타낸 것이다. 각 구간에서 동작하는 스위치의 수를 구간별로 구분했을 때 3개가 동작하는 구간은 180° 도통방식과 같은 동작을 하고, 2개가 동작하는 구간은 120° 도통방식과 같은 동작을 하게 된다.

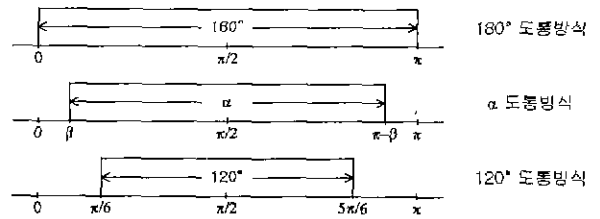
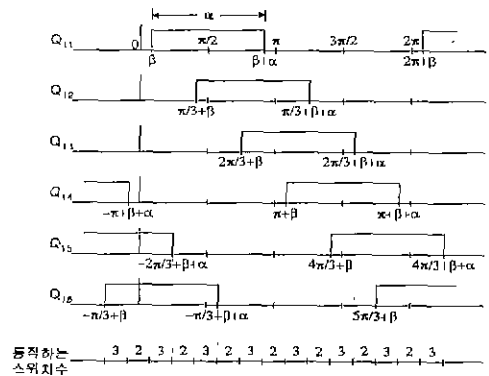
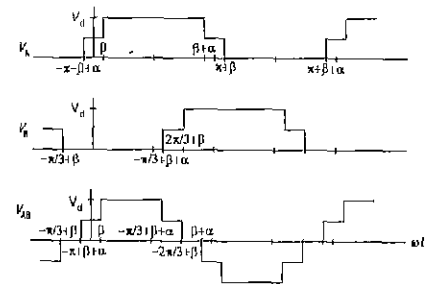


그림 3. 도통방식에 따른 펄스폭의 변화
Fig. 3. Pulse width variation depending on conduction modes.



(a) 게이트 신호



(b) 선간전압 v_{AB}

그림 4. α 도통방식의 게이트신호와 출력전압
Fig. 4. Gate signals and output voltage in α -conduction mode.

$\beta = (\pi - \alpha)/2$ 의 관계를 적용하여 그림 4(b)의 v_{AB} 파형을 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$v_{AB} = \sum_n \frac{4V_d}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (1)$$

n 이 홀수이고 $\cos(n\pi/6)$ 항이 3의 배수에서 0이므로 존재하는 고조파의 차수는 $(6k \pm 1)$ 차가 된다.

선간전압 기본파 성분의 실효값 $V_{1,L-L}$ 은

$$V_{1,L-L} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

이다. 펄스폭의 범위가 $2\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$ 이므로 $V_{1,L-L}$ 은

$$\frac{3\sqrt{2}}{2\pi} V_d \leq V_{1,L-L} \leq \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \quad (3)$$

의 범위를 갖는다. $(3\sqrt{2}/2\pi)V_d$ 는 $(\sqrt{6}/\pi)V_d$ 의 0.866배이므로 가변되는 전압의 마진은 최대값인 $(\sqrt{6}/\pi)V_d$ 을 기준으로 하여 13.4%이다. 연구중인 전철시스템에서 직류전력 회생을 위한 인버터의 동작 개시전압은 직류 1,850V이고 동작 중지전압은 직류 1,630V이므로 11.9%의 제어폭이 요구된다. 그러므로 α 도통방식의 구형파 인버터를 사용하면 입력전압이 1,850V~1,630V로 변하더라도 출력을 일정하게 유지할 수 있다. 또한 제어폭에 13.4-11.9=1.5%의 여유가 있고 그림 3.4(a)의 하단에 표시했듯이 180°도통방식과 120°도통방식이 교대로 나타나고 있으므로 데드타임 설정에 문제가 없다.

4. 고조파 저감을 위한 시스템 구성

고조파의 저감 측면에서는 다중펄스 PWM방법이 구형파 인버터보다 더 효과적이지만 빈번한 스위칭으로 인한 스위칭 손실을 무시할 수 없다. 전철시스템이 대용량임을 감안한다면 스위칭 손실이 큰 다중펄스 PWM방법보다는 구형파 인버터의 다중화방법이 시스템의 효율면에서 더 효과적이다.

본 논문에서는 단일 펄스 PWM기법의 인버터를 다중화하고 출력 변압기를 지그재그 결선하여 최저 고조파를 제거하며 교류 필터를 사용하여 잔존 고조파를 저감시키는 방법을 사용한다.

그림 5는 회생인버터 시스템의 구성도이다. T1의 권수비를 $N_1 = N_{T1,2}/N_{T1,1}$, T2에서 상단 권수비를 $N_2 = N_{T2,21}/N_{T2,1}$, 하단 권수비를 $N_3 = N_{T2,22}/N_{T2,1}$ 라 하면 지그재그 결선에 의해 R상의 전압 v_{RN} 은 다음과 같다.

$$v_{RN} = N_1 v_{AB} + N_2 v_{ab} - N_3 v_{bc} \quad (4)$$

그림 5에서 $N_2 = N_3$ 이면 각 상의 위상을 원래대로 유지할 수 있다.^[1] 따라서 $N_2 = N_3 = N_a$ 라 놓으

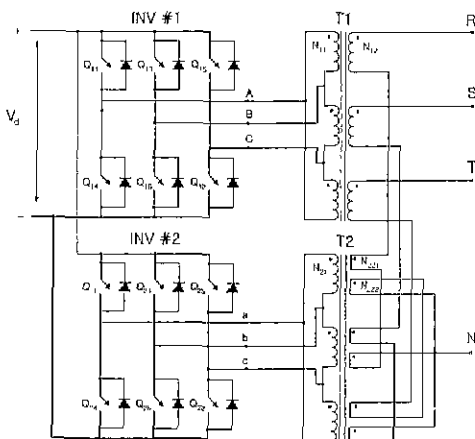


그림 5. 회생인버터 시스템의 구성

Fig 5. Configuration of regenerating inverter system.

면 v_{RN} 은 식 (5)와 같으며 v_{AB} 와 위상이 동일하게 된다.

$$v_{RN} = \sum_n^{\text{odd}} \frac{4V_d}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \left(N_1 + 2N_a \cos \frac{n\pi}{6}\right) \sin n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (5)$$

여기서, 변압기 권수비가 $N_1 = \sqrt{3}N_a$ 의 관계를 갖도록 결선하면 n 차 고조파 전압의 크기는

$$V_{np} = \frac{4V_d}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) N_a \left(\sqrt{3} + 2 \cos \frac{n\pi}{6}\right) \quad (6)$$

가 된다. 그러므로

$$\sqrt{3} + 2 \cos \frac{n\pi}{6} = 0 \quad (7)$$

이 성립하면 $V_{np} = 0$ 가 0이 된다. 식 (7)을 만족하는 n 값은 n 이 홀수이므로 $6(2k-1) \pm 1$ 이며, 따라서 $6(2k-1) \pm 1$ 차의 고조파가 제거된다. 그러므로 그림 5와 같이 지그재그 결선 변압기를 사용하면 $(12k \pm 1)$ 차의 고조파만 남게 되며, 존재하는 고조파의 최저 차수는 11차가 된다.

잔존 고조파의 크기를 저감시키기 위해서 교류필터를 출력변압기 뒷단에 설치한다. 교류필터는 특정 차수의 한 고조파만을 제거할 수 있으므로 여러 개의 고조파를 제거하려면 제거하고자 하는 고조파의 수만큼 설치하여야 한다. 그러나 대용량 시스템에서 여러 개의 교류필터의 설치는 현실적으로 어려움이 있다.

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

α 도통방식에 의해 회생용 인버터를 운전했을 때 직류 입력전압의 변동에 대한 출력전압의 크기 제어, 고조파 해석을 수행하고, 고조파 저감기법의 저감 효과에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6은 입력전압 V_d 가 변화하더라도 일정한 출력전압을 유지하기 위한 α 의 값을 나타낸 V_d 와 α 와의 관계 파형이다.

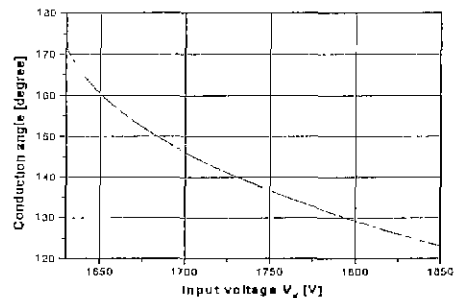


그림 6. 도통각 α 와 입력전압 V_d 와의 관계

Fig. 6. Conduction angle α corresponding to the variation of input voltage V_d .

그림 7은 입력전압 V_d 의 변화와 α 의 변화에 따른 출력전압 v_{RN} 의 THD 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 α 가 변화하더라도 THD는 180° 도통방식의 17.2%보다 항상 낮다.

표 1은 잔존 고조파를 제거하기 위하여 11차 교류필터를 설치했을 때와 12차 교류필터를 설치했을 때의 고조파 분포와 THD를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 11차 필터 하나를 설치하는 것보다는 12차 필터를 설치하는 것이 THD를 더욱 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. $\alpha = 150^\circ$ 인 경우가 THD가 가장 높을 때이고 $\alpha = 165^\circ$ 일 때가 THD가 가장 낮을 때이다. 고조파 분석결과의 수치는 기본파를 기준으로 정규화한 값이다.

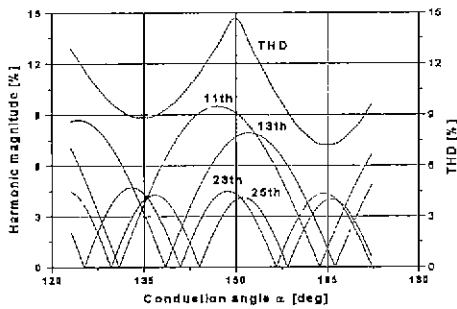


그림 7. 도통각 α 의 변화에 따른 THD 변화
Fig 7. \times THD with conduction angle α .

표 1. 교류필터 설치시의 고조파 분석(\times)
Table 1. Harmonic analysis with AC filter.

차 수	11차 교류필터		12차 교류필터		전류
	$\alpha = 150^\circ$	$\alpha = 165^\circ$	$\alpha = 150^\circ$	$\alpha = 165^\circ$	
11	1.562	1.372	2.142	1.648	0.350
13	1.721	1.406	1.229	0.994	0.503
23	1.120	1.081	1.070	0.818	0.199
25	1.136	1.166	0.960	0.835	0.215
35	0.949	0.792	0.661	0.698	0.142
37	1.002	0.774	0.597	0.740	0.106
47	0.545	0.534	0.406	0.413	0.102
%THD	3.24	2.86	3.04	2.55	0.71

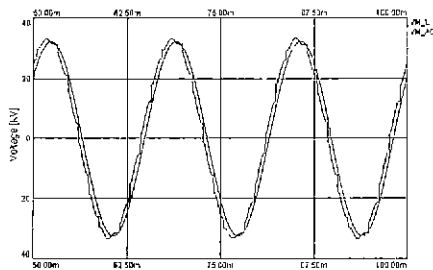


그림 8. 변압기의 출력전압과 교류모선의 전압 파형
Fig. 8. Output voltage of transformer and AC supply voltage(with an AC filter).

그림 8은 $N_1 = \sqrt{3} N_2$ 의 권수비 관계를 갖는 지그재그 결선 출력 변압기와 12차 교류필터를 설치하였을 때의 출력전압 파형을 교류모선의 전압파형과 같이 나타낸 것이다. 직류 측에서 교류모선 측으로 에너지를 회생시켜주기 위해서 인버터의 출력 변압기의 전압파형이 교류모선의 전압에 비해 위상이 앞서야 한다.

6. 결 론

본 논문은 전철시스템에서 잉여 직류전력을 교류모선으로 회생시킬 수 있는 구형과 인버터 시스템에 관한 연구로서 가변 입력전압임에도 일정한 출력전압을 낼 수 있는 제어기법에 대해 연구하였다.

잉여 직류전력을 교류모선으로 회생함에 따라 인버터의 직류 입력전압이 감소하더라도 구형과 인버터 출력전압의 기본파 성분이 일정하게 유지되도록 α 도통방식을 사용하였다. 직류전압이 변함에 따라 도통각 α 를 123.1°에서 172.2°까지 변화시킴으로써 출력전압의 크기를 일정하게 제어하였다. 이때 α 의 변화로 인해 기본파 출력의 위상이 변화하지 않도록 대칭적으로 변조하였으며, 인버터 시스템의 출력단을 Δ 결선하여 전원으로부터 에너지가 연속적으로 전달되도록 하였다.

고조파를 저감시키기 위하여 삼상 인버터 두 대를 30°의 위상차를 두어 2중화하고 출력변압기를 지그재그로 결선하여 $6(2k-1)\pm 1$ 차의 고조파를 제거하였으며, 고조파를 저감시키기 위해 12차 교류필터를 설치하였다. 그 결과 전압 THD를 2.55%까지 저감시킬 수 있었으며 전류는 THD가 0.71%로서 거의 정현적인 파형을 얻을 수 있었다.

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

참 고 문 헌

- [1] 김명수 외, "직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp. 464-468, 1999.
- [2] T. Suzuki and B. Tech, "DC Power-Supply System with Inverting Substations for Traction Systems Using Regenerative Brakes", IEE Proceedings, Vol. 129, Pt. B, No. 1, pp. 18-26, January 1982.
- [3] M. H. Rashid, *Power Electronics*, Prentice-Hall, Inc., 1998.