

# SVPWM을 이용한 전기철도용 회생 인버터 개발

정문구, 백병산, 김태완, 류승표, 김남해  
 현대중공업(주) 기계전기연구소

## Development of Regenerative Inverter for Electric Railway Using Space Vector PWM

M.G. Jung, B.S Baek, T.W. Kim, S.P. Ryu, and N.H. Kim  
 Electro-Mechanical Research Institute of Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

### ABSTRACT

The electric power, regenerated while railway vehicles braking or running downhill, makes DC line voltage rise and the feeding system may not be secure. In order to keep away from these kind of insecurity, the regenerative energy should be consumed by loads or transmitted to the AC side via certain devices such as DC/AC converters. This paper introduces the developed regenerative inverter for electric railway.

### 1. 서 론

최근 전력전자기술의 발달에 힘입어 직류 전기철도 각 노선 구간에는 회생에너지를 활용하기 위하여 회생차량이 널리 투입되고 있다. 그러나, 급전선에 나타난 잉여 회생에너지는 적절히 처리되어지지 않는다면 전기철도 급전계통 및 기기에 악영향을 미칠 수 있어 이에 대한 대책이 강구되어 왔다.

이러한 대책의 일환으로 사용되어지는 회생 인버터는 회생제동 시 발생하는 잉여 직류전력을 교류전력으로 변환하여 교류부하에 공급하는 것을 목적으로 하는 설비로서, 본 설비를 채용할 경우 전기철도 직류급전계통의 경제성 및 신뢰도 제고를 도모할 수 있다.

본 논문에서는 전기철도 직류급전계통에 적합한 회생 인버터의 설계기준, 기술사양, 전력회로, 인버터 제어기법, 개발 시스템, 시험결과 및 특성 등을 기술하였다.

### 2. 전기철도용 회생 인버터

#### 2.1 설계기준

설계 기준으로 전기철도용 전력변환장치로서의 기술기준도 중요하지만, 보다 중요한 것은 차량에서 넘어오는 회생에너지가 매 순간마다 정현파의 양질의 전기로 변환되어 계통에 영향 없이 전송되어야 한다는 것이다. 회생 인버터 시스템의 구성 예는 다음 그림 1과 같다.

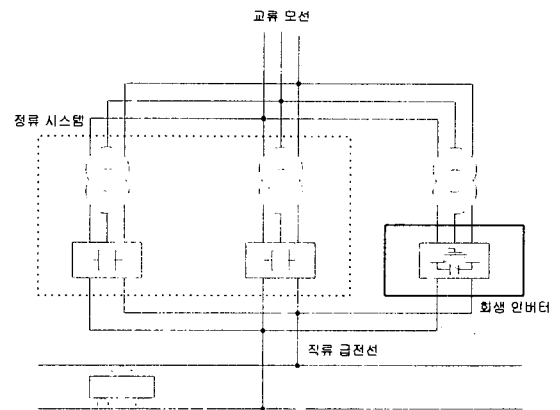


그림 1 회생 인버터 시스템 구성 예

그림 1에서 보여진 바와 같이 회생 인버터의 입력부는 정류기의 출력단으로 정류기가 실리콘 다이오드 정류기인 경우 항상 전압이 변동하여 리플 및 서지성 노이즈가 존재하므로 이를 고려하여 설계해야 한다.

인버터의 제어는 먼저 출력단의 연계계통과 위상동기를 맞추어서 원하는 출력을 얻도록 제어되어야 하며, 또한 직류 입력단이 항상 일정하지 않으므로 직류입력이 변동하여도 인버터 출력의 교류 전압을 일정하게 제어할 수 있어야 한다.

인버터의 용량 및 과부하 내량은 시스템에 따라 회생 에너지를 산정하여 설계되어야 하는데 보통 회생에너지는 짧은 시간동안 발생하므로 용량을 줄이고 과부하 내량을 크게 설계하고 있다.

인버터 출력단에는 연계교류계통의 전압레벨 및 고조파 허용율을 고려하여 보통 필터장치, 변압기 및 인터페이스 장치 등으로 구성되는데, 여기에서는 계통과 연계시 고려해야 하는 고조파 함유율(한전 규제치의 경우 154kV급 1.5%, 22.9kV급 3%) 및 위상의 일치 등이 중요하다. 또한 출력단의 변압기의 입·출력 전압레벨은 물론 과부하 내량도 시스템에 적합하게 설계되어야 한다.

## 2.2 기술사양

경량전철 시험선용으로 전력용 반도체자인 IGBT와 SVPWM 스위칭 방식을 포함한 디지털제어 기술을 적용하여 개발·제작한 회생 인버터 시스템의 기술사양은 표 1과 같다.

표 1 회생 인버터 기술사양

전기적 사양	정격용량		100kVA
	과부하내량		300%, 30초
	입력(직류)	정격전압	750V
		허용범위	700-1000V
	출력(교류)	정격전압	삼상 440V
		왜형율	3% 이하
주파수		60Hz	
효율		95% 이상	
기타 사양	제어방식		완전 디지털 제어
	적용소자		IGBT
	냉각방식		강제 공냉식
	소음		70dB 이하
	MMI	장치	Touch screen
		기능	실측값, 동작 상태 및 고장 내용 등
Dimension(DxWxH)		1200x1000x2100	

## 2.3 시스템 모델링

전력회로의 설계 및 제어동작에 대한 컴퓨터 모의를 위하여 그림 2와 같이 모델링하였다.

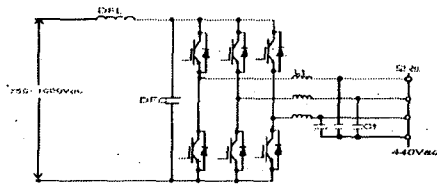


그림 2 시스템 모델링 회로도

상기 회로도로부터 시스템 상태방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$i_c = C_f \frac{dv_s}{dt} = i_i - i_s \quad (2-1)$$

$$v_i = R_f i_i + L_f \frac{di_i}{dt} + v_s \quad (2-2)$$

여기서, 필터부의 저항값  $R_f$ 는 무시하고, 첨자  $i$ 는 인버터 출력단을 의미하고,  $s$ 는 인버터 필터 출력단을 의미하며,  $c$ 는 필터 캐패시터단을 의미한다.

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\theta = \omega t \quad (2-4)$$

여기서,  $\omega$ 는 모션전원전압의 각속도이고,  $\theta$ 는 a상과 d상의 위상각차이며, dq 변환의 영상성분은 무시한다.

(1-1)과 (1-2)의 두 식을 (1-4)를 이용하여 dq 변환하면 다음과 같은 상태방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{qs} \\ \dot{v}_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} + \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{qi} \\ i_{di} \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{qi} \\ \dot{i}_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qi} \\ i_{di} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

## 2.4 SVPWM

3상 PWM 인버터의 제어는 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) 방식이 일반화되고 있고, 출력 특성 또한 좋은 것으로 평가받고 있다. SVPWM의 동작원리를 설명하면 다음과 같다. 그림 3에 보여진 바와 같이 기준전압벡터  $V^*$ 가  $V_1$ 과  $V_2$  사이의 sector 1에 있다 가정할 때 식(2-7)에 따라  $T_1$ 과  $T_2$ 는 계산되어질 수 있다. 계산되어진 전압  $T_1$ 과  $T_2$  구간별로 그림 4의 스위칭 시퀀스에 따라 게이트 신호를 발생시키면  $T_s$ 동안 교류 출력 평균전압은  $V^*$ 이 되게 된다.

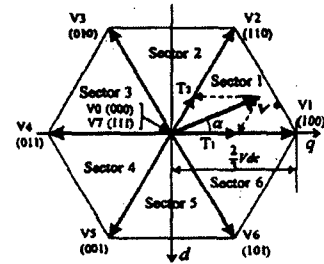


그림 3 스위칭 상태 벡터도

$$\begin{aligned} T_1 V_1 + T_2 V_2 &= V^* \\ T_1 + T_2 + T_0 &= T_s \end{aligned} \quad (2-7)$$

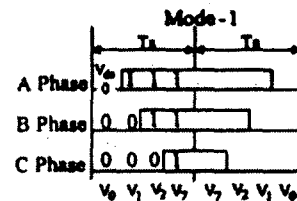


그림 4 스위칭 시퀀스

여기서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 인버터가  $V^*$ 을 출력하기 위한  $V_1$ 과  $V_2$ 의 인가시간이다.

## 2.5 제어 알고리즘

회생 인버터의 제어는 인버터가 회생동작을 요구받으면 출력단 전압과 동기되고 역률 1.0으로 제어된 회생에너지가 계통에 과도현상 없이 보내지도록 되어야 한다. 이를 위하여 입력되는 직류전압을 검지하여 회생량을 결정하고, 출력계통의 전압 및 전류를 dq 변환하여 유효전력 및 무효전력제어가 가능하게 한 제어 알고리즘은 그림 3와 같다.

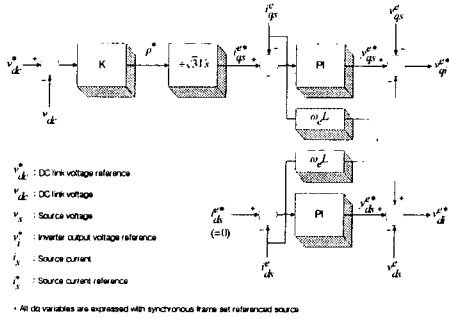


그림 5 회생 인버터 제어 알고리즘

교류전원의 전압을 일정하다할 때, 급전선에 입력되는 회생전력은 급전선 전압의 상승과 비례하므로 그 전압을 항상 감시하여 일정전압 이상 상승하는 경우, 그에 비례하는 전력을 계산하고 그로부터 전류를 계산하여 교류전원전압과 위상을 고려하여 모선에 전류를 주입한다.

제어는 그림 5에 나타낸 바와 같이 내부 루프 순시전류제어와 외부 루프 전력제어로 구성된다. 순시전류제어는 PI 제어기로 구성된다. 교류모선전압과 교류모선주입전류가 동상을 유지하기 위해서는 교류모선전압을 위상의 기준으로 잡는다면 모선주입전류의 d-축 값이 영이 되어야 한다. 동기좌표축으로 변환 시 d축과 q축 사이에는 인덕터에 의한 간섭성분이 존재하는데 이를 배제하기 위해 비간섭항을 둔다. 외부 루프의 전력제어는 급전선 전압의 기준값과 실제값과의 차이에 비례하는 회생전력을 계산하는 P 제어기 형태로 구성된다.

## 2.6 디지털 제어기 구현

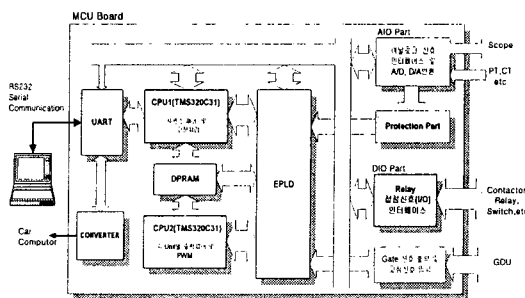


그림 6 회생 인버터 제어기의 구성도

디지털 제어기는 그림 6에서 상세하게 보여지고 있다.

각 제어보드의 관계와 주요 제어기능을 함께 나타내었으며, 신뢰성 및 제어기능 확장성을 고려하여 완전 디지털 회로로 구성하고, 아날로그 신호부와 디지털 신호부를 완전 분리하였다. 또한 다양한 방법으로 시스템의 관리가 가능하도록 설계하였음을 알 수 있다.

개발·적용된 제어기의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 사용된 프로세서인 TMS320C31은 50MHz, 32비트 실수 연산을 수행하며, C컴파일러를 지원하기 때문에 각종 호환용 제어 기능 및 정보관리 프로그램을 C언어로 구현함으로써 기능 향상 및 변경이 요구될 경우 쉽게 구현할 수 있다.

둘째, 높은 신뢰성 제어 시스템을 확보하고자 고성능 DSP와 EPLD 등을 사용하여 집적화시킴으로써 부품 수를 최소화하여 간단히 구성하였다. 이로써 잡음 등의 발생 부분과 고장 확률을 줄였다.

셋째, 자기 진단 기능 시스템의 안정된 동작 수행을 위해 초기 전원 인가시 표준 데이터버스에 병렬로 접속되어 구동되는 DSP는 자기 고장 진단뿐만 아니라 주변 기능도 진단한다. 이때, 하드웨어적인 면은 물론이고 여러 가지 제어 패턴 등 소프트웨어적인 면도 진단하며, 진단의 결과는 저장된다.

넷째, 시스템 정보 관리 측면을 살펴보면 모든 동작 정보는 메모리에 저장되어 관리된다. 검수자 및 관리자는 이러한 정보를 일반 컴퓨터와 통신을 이용하여 쉽게 전달받을 수 있다. 정보취득은 항상 가능하며 저장된 고장 자료뿐만 아니라 동작중인 실시간 자료도 취득할 수 있다.

## 2.7 모의결과

회생 인버터의 회생동작 및 성능에 관련된 파형을 소개하면 다음과 같다. 그림 7과 그림 8은 컴퓨터 모의 파형으로 각각 정격 회생시 모선전압, 전류 및 인버터 전압과 출력필터 전압 및 THD를 나타낸다.

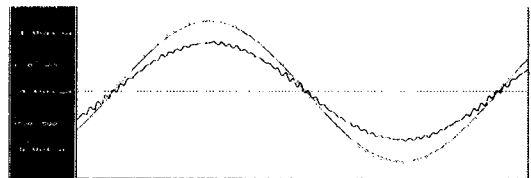


그림 7 정격 회생시 모선전압, 전류 및 인버터 전압



그림 8 정격 회생시 출력필터 전압 및 THD

## 2.8 실험결과

개발된 회생 인버터의 외관은 그림 9와 같다.

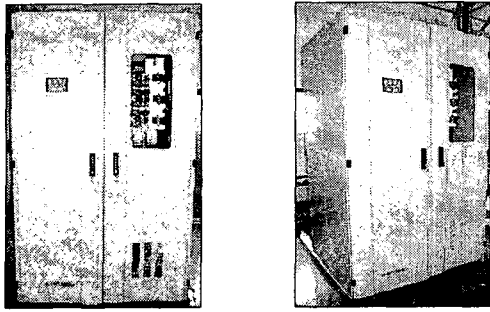


그림 9 개발 시스템 외관

이 설비는 경량전철 시험선에 적용하기 위하여 시험선에 적합한 용량으로 설계·제작되었고, 이를 인증시험을 통하여 그 성능을 검증 받았다. 인증시험 과정에서 나온 결과물들은 다음 그림들과 같다.

그림 9는 정격 회생시 인버터 출력 상전압과 상전류의 파형이다. 파형이 정현파에 매우 가깝다는 것을 알 수 있다.

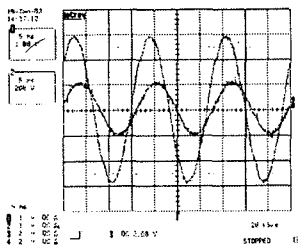


그림 9 정격 회생시 출력 파형(상전압, 상전류)

그림 10은 현대중공업(주)에서 개발한 자체 프로그램(On-line Monitoring program)에 의하여 측정된 파형으로 300kW(300%) 회생동작시 특성을 보여주고 있다.

직류입력전압(V) : 400V/div
직류입력전류(A) : 50A/div
직류입력용크리드 커패시터 전압(V) : 400V/div
교류출력RMS전압(V) : 200V/div
교류출력RMS전류(A) : 100A/div
회생전력(kW) : 40kW/div

시간 축(20초/div)

그림 10 300kW 회생시 출력 프로파일

표 3은 한국전기연구원 시험성적서의 일부이다.

표 3 한국전기연구원 시험성적서의 일부

직류 입력			교류 출력						
전압 (V)	전류 (A)	전력 (kW)	전압 (V)	전류 (A)	주파수 (Hz)	역률	THD	전력 (kW)	
755.5	140.8	106.4	UV	419.3	U	142.0	59.9	1.0	[전압]
			VW	416.2	V	140.9			1.80%
			WU	413.2	W	141.3			[전류]
								1.76%	102.1

### 3. 결론

본 논문은 전기철도 직류급전계통에서 전동차가 직류 모션으로 전력을 회생하게 될 때, 직류모션전압의 상승과 이 과전압에 의한 기기 손상 등을 방지하기 위해 발생한 직류전력을 교류전력으로 변환하여 교류 전원으로 전력을 재공급하는 회생 인버터의 설계기준, 기술사양, 전력회로, 인버터 제어기법, 개발 시스템, 시험결과 및 특성 등을 기술하였다.

본 설비는 경량전철 시험선에 적합한 용량으로 설계·제작된 것으로 시험선 공사(전남 목포 삼학도)가 완료되면 설치하여 실증시험을 통하여 신뢰성을 확보할 계획이다.

### 참고 문헌

- [1] Mohan, "Power Electronics Converters, Application and Design", John Wiley & Sons, 1989.
- [2] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives Technology and Applications", IEEE Press, 1996.
- [3] William M. Flanagan "Handbook of Transformer Design & Applications", McGraw-Hill Inc., 1992.
- [4] "TMS320C30 Assembly language Tools User's Guide", Texas Instrument.
- [5] Satoshi Ogasawara, Jin Takagaki "Novel Control Scheme of a Parallel Current-Controlled PWM Inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, pp. 1023~1030, 1992.
- [6] Joachim Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion", IEEE Pro. Vol. 82. No. 8, pp. 1194~1215, August 1994.
- [7] Hans-Christoph Skudelny "Analysis and Realization of Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 24, No. 1, pp. 142~150, Jan./Feb. 1988.
- [8] Frede Blaabjerg "Adaptive SVM to Compensate DC-Link Voltage Ripple for Four-Switch Three-Phase Voltage-Source Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 14, No. 4, pp. 743~752, July 1999.
- [9] Chihchiang Hua "High Switching Frequency DSP Controlled PWM Inverter", IEEE Conference on Control Applications, Vol. B, pp.273~283, 1993.
- [10] "Semikron innovation + service" Data Book, 1999.
- [11] 서광덕, "전동차용 전원장치의 출력전압 제어 안정성 향상", 한국조명&전기설비학회지, vol. 13, No. 4, pp. 134 ~ 141, 1999. 11.
- [12] 건설교통부, 경량전철 전력공급시스템 기술개발 4차년도 연구결과보고서, 2002. 12.