

빠른 응답성을 갖는 단상 PWM Converter

A Single-Phase PWM Converter with fast response

배기훈*
Bae Ki-hoon

기상우*
Kee Sang-woo

최종목*
Choi Jong-Mook

ABSTRACT

In most railway vehicle applications, a single phase AC/DC converter is used greatly and is essential equipment for Korea High Speed Train.

A diode bridge rectifier and a phase-controlled thyristor bridge rectifier generate harmonics in power system. Nowadays, power factor and harmonics become major issue in electrical equipment for railway vehicle. Many researchers have been trying to improve the power factor and ac-side harmonics. Therefore the PWM converter is used to operate at unity power factor and to reduce ac-side current harmonics.

This paper describes the circuit for AC/DC PWM converter of Korea High Speed Train and proposes control algorithm to realize the sinusoidal input current waveform and the effective unity power factor. The validity of the proposed control method is verified through the experimental result.

1. 서론

AC를 DC로 변환하는 전력변환 장치는 전력변환 응용 분야에 있어서 큰 부분을 차지하고 있다. 특히 단상 AC/DC 컨버터는 철도차량용으로 많이 사용되고 있으며, 한국형 고속전철 개발에도 필수적인 전력변환장치가 되었다.

한편, 전력용 반도체의 발달과 제어기법의 발전은 전력변환장치의 성능 및 효율에 큰 영향을 미치고 있다. 소자 발전 측면에서 보면 다이오드나, 전류(轉流) 회로가 필요한 싸이리스트 대신 자기소호 능력이 있는 MOSFET나 IGBT등이 최근에 산업계에서 일반적으로 사용되고 있으며, 대용량 IGBT(3300V/1200A) 개발에 의하여 철도차량에서도 IGBT가 채용되고 있다.

한국형 고속전철의 보조전원용으로 사용되는 AC/DC 변환장치는 기존 경부고속전철의 싸이리스트를 이용한 위상제어 방식 대신 IGBT를 이용한 AC/DC PWM 컨버터를 사용하고 있다. AC/DC PWM 컨버터는 전원의 입력전류파형을 정현파로 유지함으로써 저차고조파가 감소되며, 전원측 역률을 진상, 지상 또는 1로 유지하는 것이 가능하여 양방향 전력의 흐름이 가능하다.

본 논문에서는 전원측 역률을 1로 유지하면서 출력측 전압을 일정하게 하는 한국형 고속전철 보조전원용 AC/DC PWM 컨버터의 4병렬 회로 구성 설명과 1대의 AC/DC PWM 컨버터의 스위칭에 의한 모드를 분석하고 시뮬레이션을 수행한다. 또한 시뮬레이션을 바탕으로 한 축소형 모델에 의한 실험을 통하여 제어방법의 타당성을 나타내었다.

* 대우중공업 철차연구소, 비회원

2. 컨버터의 동작 및 제어

2.1 컨버터의 동작

한국형 고속전철의 보조전원용으로 사용하는 PWM 컨버터는 주변압기의 3차 권선에서 단상 380VAC를 입력받아 출력 670VDC를 공급하는 전력변환장치이다. 용량은 1.4MW이고, 입력전류의 리플을 감소하기 위하여 4대의 컨버터를 병렬 운전하며, redundancy 개념으로 2군2병렬 운전을 한다. 그림1은 사용되는 전력회로블록도를 나타낸다.

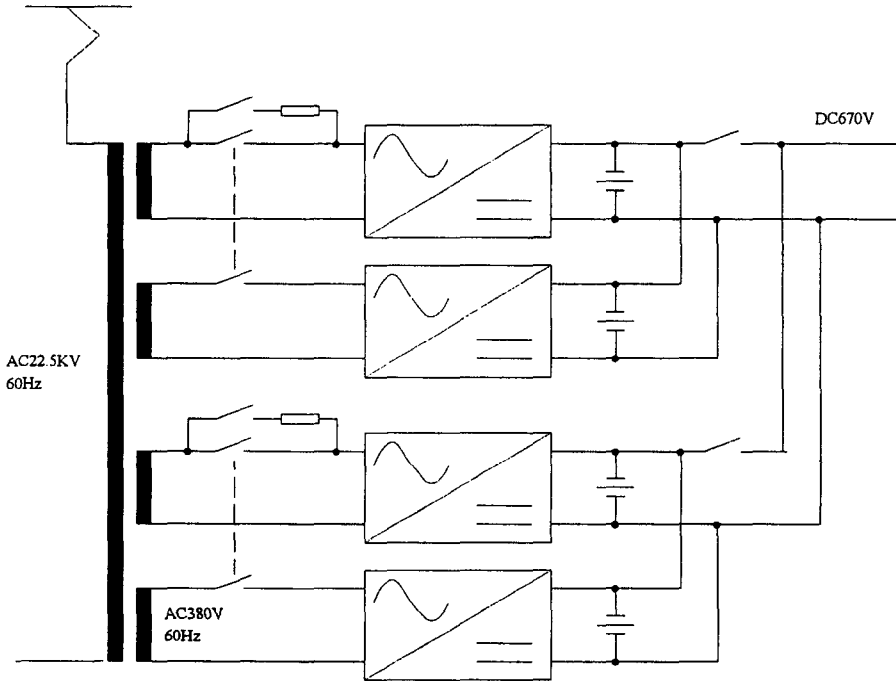


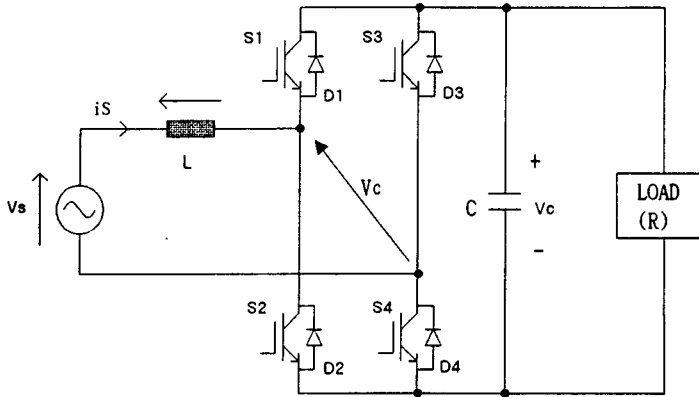
그림1. PWM 컨버터 전력회로블록도

그림2은 각 단상 AC/DC PWM 컨버터에서 사용되는 기본 회로도를 나타낸다. 단상 컨버터는 1700V/1800A의 IGBT를 사용하여 회로를 구성하였으며, 입력단 승압용 리액터는 변압기의 누설 인덕턴스를 사용하며 크기는 0.24mH이다.

입력전류 $i_s(t)$, 직류캐패시터전압 $v_c(t)$ 를 상태변수로 하고, 입력전압 $v_s(t)$ 를 입력으로 하였을 때 스위칭의 상태를 고려한 PWM 컨버터의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{S(t)}{L} \\ \frac{S(t)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad [us]$$

$$S(t) = \begin{cases} 1 : S_{1,3} = on, & S_{2,4} = off \\ 0 : S_{2,4} = on, & S_{1,2} = off \end{cases}$$



V_s : 입력전압
 L : 승압용 리액터
 C : 평활용 캐패시터

그림2. PWM 컨버터 기본 회로도

상태 방정식을 모드별로 분석하면 표1과 같다. 모드별 분석표에서 보듯이 스위칭 상태에 따라서 역행 및 회생모드가 존재하나, 한국형 고속전철 보조전원용인 경우는 회생 부하가 존재하지 않으므로 회생모드가 존재하지 않는다. 또한 모드별 분석표에서 알 수 있듯이 D1, S3가 도통하여 전원단락이 되면, 전원전압에 의해 리액터의 전류가 증가하고, 이는 자기에너지의 형태로 리액터에 축적된다. 이 축적된 에너지는 리액터의 성질에 의해 D1, D4 도통시 캐패시터 전압이 입력측 전압보다 높게되어도 캐패시터로 유입되어 출력측 직류전압이 입력측 교류전압의 최대치보다 높게 되도록 제어된다.

표1. 모드별 분석

v_s	i_s	v_c	On device	i_s	에너지 이동	모드
$V_s > 0$	$i_s > 0$	0	D1 S3 or S2 D4	$i_s \uparrow$	$V_s \rightarrow L$	역행모드
		Vdc	D1 D4	$i_s \downarrow$	$V_s + L \rightarrow DCside$	역행모드
		-Vdc	S2 S3	$i_s \uparrow$	$V_s + DCside \rightarrow L$	역행모드
	$i_s < 0$	0	S1 D3 or D2 S4	$i_s \downarrow$	$L \rightarrow V_s$	회생모드
		Vdc	S1 S4	$i_s \uparrow$	$DCside \rightarrow V_s + L$	회생모드
		-Vdc	D2 D3	$i_s \downarrow$	$L \rightarrow V_s + DCside$	회생모드
$V_s < 0$	$i_s > 0$	0	D1 S3 or S2 D4	$i_s \downarrow$	$L \rightarrow V_s$	회생모드
		Vdc	D1 D4	$i_s \downarrow$	$L \rightarrow V_s + DCside$	회생모드
		-Vdc	S2 S3	$i_s \uparrow$	$DCside \rightarrow V_s + L$	회생모드
	$i_s < 0$	0	S1 D3 or D2 S4	$i_s \uparrow$	$V_s \rightarrow L$	역행모드
		Vdc	S1 S4	$i_s \uparrow$	$V_s + DCside \rightarrow L$	역행모드
		-Vdc	D2 D3	$i_s \downarrow$	$V_s + L \rightarrow DCside$	역행모드

또한 해석의 이해를 돕기위하여 벡터도로 나타내면 그림3과 같다. 벡터도에서 알 수 있듯이 컨버터 입력전압(vc)의 크기(Duty ratio)와 전원전압과의 위상(α)를 제어함에 의하여 진상, 지상, 단위역률 운전등이 가능하다. 특히 한국형 고속전철 보조전원용 AC/DC PWM 컨버터의 경우에는 출력전압을 일정하게 유지하면서 단위역률 운전이 목표이며, 단위역률 운전을 하기 위해서는 $V_s = V_c \times \cos \alpha$ 인 관계가 성립하여야 한다.

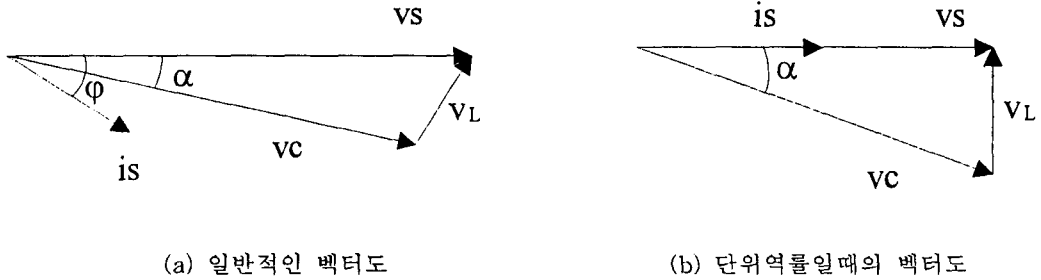


그림3. PWM 컨버터 벡터도

2.2 제어기법 및 제어기 구성

그림4는 본 논문에서 사용한 제어블록도이다. V_{dc}^* 는 출력측 직류전압의 지령치이며, 시스템에서 검출한 값 V_{dc} 와 비교하여 V_{dcerr} 를 만든다. 이 전압오차 신호를 전압제어 보상회로인 PI제어기에 입력하여 필요한 전류제어신호의 크기를 결정한다. 또한 입력전압과 입력전류의 위상을 맞추기 위하여 전압제어보상회로의 출력값에 전원전압과 동상인 단위 정현파 V_s 를 곱하여 전류 지령치를 만든다. 이 전류 지령치는 시스템에서 검출한 입력전류와 비교하여 전류오차 신호를 만들고, 이를 전류제어 보상회로에 인가하여 PWM 제어의 입력신호를 만든다.

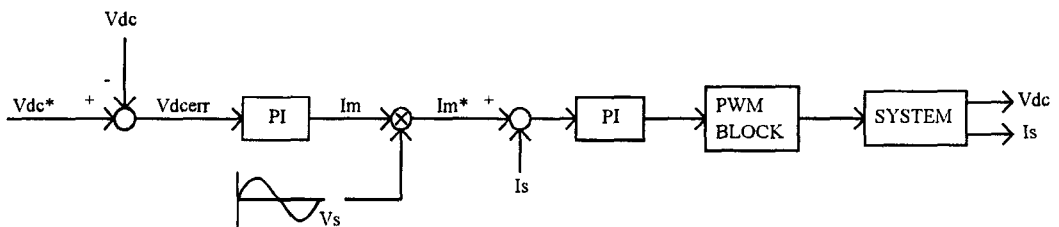


그림4 제어 블록도

본 제어기 구성은 DSP보드, SENSOR보드, DIO(Digital Input Output)보드로 구성되었으며, DSP보드에는 TI사의 TMS320C31의 DSP를 이용하였고, EPLD(Electrical Programmable Logic Device)를 적용하여 주변소자 및 배선수를 최소화 하였다. 특히 EPLD로는 ISP(In-System Programmability) 기능을 가지는 Altera사의 MAX7000시리즈중의 한가지인 EPM7192S를 사용하였다. EPLD의 역할은 DSP에서 계산된 신호를 입력받아 데드 타임을 고려한 IGBT Gate Driver의 게이팅 신호를 만들며, 그밖에 인터럽트 신호 및 어드레스 디코딩 신호등을 발생시킨다.

사진 1은 본 제어기에 사용된 DSP보드를 나타내고 있다.

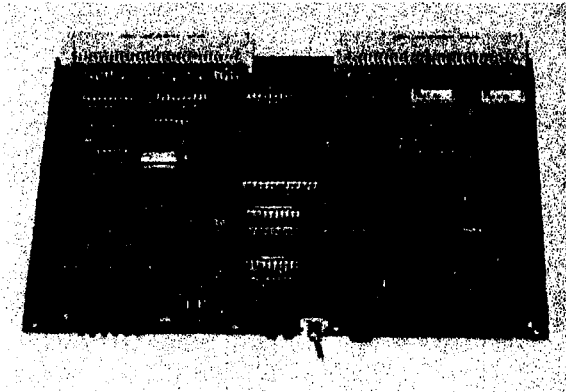


사진1. DSP 보드

3. 시뮬레이션 및 시험과형

그림5는 축소형 AC/DC PWM 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 여기에서 사용된 입력전압의 크기는 220VAC이며, 출력전압을 400VDC로 제어하였다. 또한 부하는 저항부하로 4.4Ω을 연결하였으며, 승압용 리액터의 크기는 0.5mH이며, 직류단의 링크 캐패시터는 6000μF이다. 스위칭 주파수는 900Hz로 하여 시뮬레이션을 하였다.

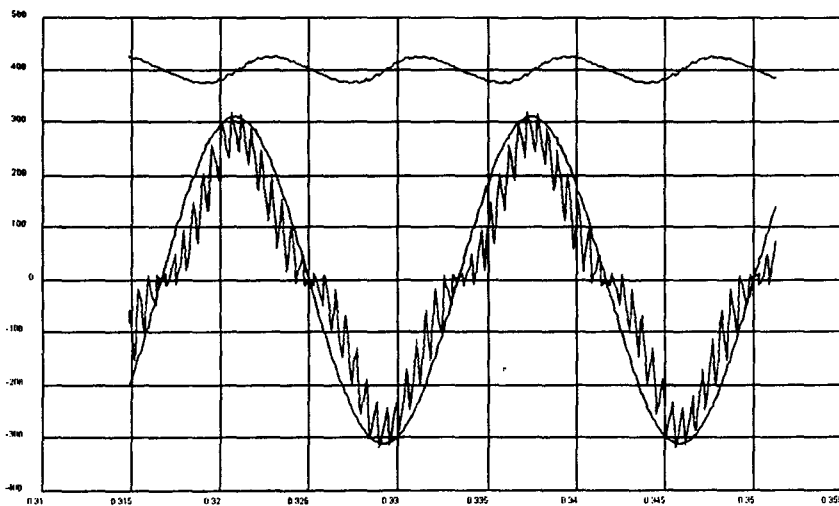
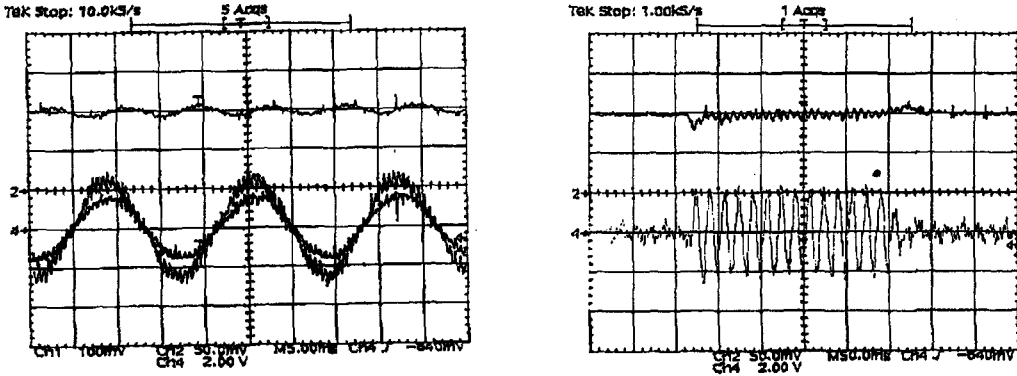


그림5 축소형 AC/DC PWM 컨버터 시뮬레이션 파형

그림6은 실제 축소형 AC/DC PWM 컨버터의 실험파형이다. 축소형 AC/DC PWM 컨버터는 시뮬레이션과 동일한 파라메타에서 실험하였다. 그림6에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 파형과 실제 파형이 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며, 입력전압과 입력전류가 거의 위상차가 없음을 알 수 있었다. 또한 30kW의 부하변동에도 수 사이클안에 출력전압이 잘 제어됨을 알 수 있었다.



입력전압 : 400/Div. 입력전류 : 200A/Div. 출력전압 : 200V/Div.
 (a) 입력전압, 입력전류 및 출력전압 (b) 부하변동시의 입력전류 및 출력전압

그림6. 축소형 AC/DC PWM 컨버터 전압 전류 파형

4. 결론

본 논문에서는 AC/DC PWM 컨버터를 사용하여 고역률 및 직류출력전압 조절이 양호하게 제어됨을 시뮬레이션 및 실험을 통해 알 수 있었으며, 또한 부하 변동시에도 출력전압이 수 사이클 안에 원하는 전압으로 잘 제어됨을 알 수 있었다. 본 시뮬레이션 및 실험을 통해 얻은 결과를 한국형 고속전철 보조전원용 AC/DC PWM 컨버터에 적용할 예정이다.

앞으로 연구는 변압기의 누설 인덕턴스를 사용하여 병렬운전이다. 병렬운전에 발생하는 상호 간섭을 없애기 위하여 비간섭 이론을 도입하여 실험을 수행할 것이며, 또한 판토 바운싱에 의한 변압기의 편차 현상에 대하여도 계속 연구할 예정이다..

참고 문헌

1. 정구호외, "새로운 벡터적 PLL를 이용한 대용량 무효전력 보상기(SVC)의 DSP제어" 대한전기학회 하계학술 대회,1996
2. O. Stihl and B. T. Ooi, "A Single-Phase Controlled-Current PWM Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.3, No.4, pp.453-459, October, 1988
3. R. Wu, S.B.Dewan, G.R.Slemon, "A PWM AC-to-DC Converter with Fixed Switching Frequency ", IEEE Trans. on Ind. Appl, Sep, Vol.26, No.5, pp880-885, 1990
4. Muhammad H. Rashid, "Power Electronics", Prentice Hall, 1933