

고속전철용 단상 PWM 컨버터에 관한 연구

김연준*, 김두식, 이현원, 서광덕, 김남해
 현대중공업(주) 전력전자연구실

A Single Phase PWM Converter for High Speed Traction System

Y.J.Kim, D.S.Kim, H.W.Lee, K.D.Seo, N.H.Kim
 Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.
 Power Electronics R&D Dept.

ABSTRACT

This paper describes a design of a single phase PWM converter for high speed train. Parallel operation and control method of four quadrant PWM converters are described. Simulation and modelling of the converters is performed. Capacity of the converter/inverter and power circuit for high speed traction system designed. And harmonic contents of AC line currents are analyzed. The results of the simulation are presented.

1. 서론

20세기에 들어서면서 산업구조의 실질적인 분업과 교역량의 양적인 증대로 인하여 물류수송의 중요성 및 대량수송과 수송수단의 고속화가 날로 비중을 더해감에 따라 이러한 수단의 전력변환장치에 대한 성능향상, 효율향상 연구가 필요하게 되었다. 이러한 방편으로 철도차량용 주전력변환장치로 추진제어부 및 변전설비의 고효율화를 위해 판타그라프로부터 교류의 가선 전압 25,000V를 받아서 직류로 변환(교류/직류)하는 장치인 컨버터와 견인전동기를 구동하는 인버터장치로 구성된 전력변환장치가 적용되었다. 이는 회생제동 에너지를 전원으로 환원하여 전력 이용율을 높일수 있게 하였다. 전력용 반도체의 발달에 힘입어 컨버터 및 인버터에 사용되는 스위칭 소자 역시 싸이리스터 대신 자기소호 능력이 있는 대용량의 GTO(Gate Turn-off Thyristor), IGBT등을 사용하게 되었다. GTO 및 IGBT를 사용하여 종래의 싸이리스터 컨버터의 위상제어 방식 대신 펄스폭 변조방식(PWM)을 이용하여 컨버터 입력 전류가 전원 전압과 동상이 되게 제어할 수 있어 역행시 역률을 통상 1로 하는 것이 가능하며 회생제동시에 있어서도 마찬가지로 전압과 전류의 위상을 역상으로 함으로써 교역률 운전이 가능하게 됨에 따라 전력계통의 효율을 증대할수 있다. 따라서 본 문에서는 국제과제로 연구개발중인 한국형 고속철도 주전력변환장치에서 정류부를 PWM 컨버터로 설계하고, 이에 대한 제어원리와 병렬운전, 회생운전, 철도차량에 적용시 필요한 내용을 중심으로 시뮬레이션을 수행하여 검토하고 실제작시에 적용할 목적으로 한다.

본 연구는 건설교통부와 통상산업부 및 과학기술처에서 시행한 선도기술개발사업의 결과임.

2. 시스템의 구성 및 설계

시스템의 구성은 기존의 신간선, ICE와 같이 고속전철용 컨버터 회로 방식을 Boost type 4상한 PWM 컨버터를 사용하는 것으로 시스템을 구성하였다. 컨버터는 용량 증대를 위해 2대 병렬로 구성하여 입력측 고조파를 저감하도록 하였다.

컨버터 유니트는 GTO를 스위칭소자(CG TU1 ~ CG TU4)로 사용하고, Freewheeling 다이오드(CDFU1 ~ CDFU4), 교류 리액터, 직류 평할 콘덴서로 구성된다. 입력부에는 초기충전을 위해 충전 스위칭 (AK)과 충전 저항(CHRe2)이 충전회로를 구성하고 있다. 교류 리액터는 di/dt를 제한하기 위해 Arm에 삽입된다. 그림 1은 하나의 단위 전력변환 유니트가 2개의 컨버터와 1개의 인버터로 구성되었으며 한 개의 인버터에 견인전동기 두 대가 병렬로 연결되어 있다. 이와 같은 전력변환부는 전동부에 3개 존재한다.

1) 컨버터 시스템 기본 설계

전동기 사양 선정 기준에 의하여 선정된 견인 전동기 용량이 1185kW이므로 이를 기준하여 인버터/ 컨버터의 용량을 산정하면 아래와 같다.

가. 인버터부 용량계산

전동기 용량이 1185kW일 때 전동기 입력 용량은 전동기 출력 용량을 전동기의 효율($\eta_{MM} = 0.95$)로 나눈 것으로 표현한다. 즉,

$$P_{MI} = P_{MO} / \eta_{MM} = 1185kW / 0.95 \approx 1250kW \quad (1)$$

따라서 전동기의 입력 용량은 인버터 출력의 여유분을 고려하여 1250kW로 결정한다.

인버터의 출력용량(P_I)은 인버터의 효율(η_{INV})을 0.97로 하고 역률(P_{MM})을 0.82로 가정하면, 전동기 입력용량(P_{MI})에 견인전동

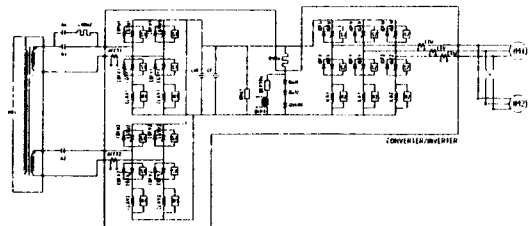


그림 1 주전력변환장치(converter/inverter)

기수를 곱하고 다시 역플로 나눈값으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P_i &= P_{MI} \times \text{견인전동기수} / P_{MM} \\
 &= 1250\text{kW} \times 2\text{대} / 0.82 \\
 &\approx 3050\text{kW}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

위에서 열거한 내용을 표로 작성하면 아래와 같다.

표 1 인버터 사양

항 목	정 격
견인전동기 (안)	1185 kW
인버터 용량	3050 kW
인버터 출력전압	2180 V
인버터 출력전류	808 A

나. 컨버터부 용량계산

컨버터 효율(η_{CON})을 0.97로 가정하여 컨버터 및 변압기 2차측 용량을 결정한다. 컨버터 출력 용량은 인버터 출력 용량에 역플로를 곱한 값에 인버터 효율로 나누어 계산한다.

$$\begin{aligned}
 P_C &= P_i \times P_{MM} / \eta_{INV} \quad (W) \\
 &= 3050\text{ kW} \times 0.82 / 0.97 \\
 &= 2578.4\text{ kW} \quad (\text{컨버터 총 용량})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

따라서 컨버터 자체의 손실을 감안한 두 대의 총용량은 2580kW로 하고, 출력전압(직류 전압)은 사용 스위칭 소자와 인버터 용량 및 견인전동기의 입력전압을 고려하여 결정하는데, 시스템 요구사항(안)에 의하여 2800V로 한다.

컨버터 출력전류(직류 링크단 전류)는 컨버터용량을 출력전압(직류전압)으로 나눈 값으로 계산한다.

$$\begin{aligned}
 \text{직류링크단 전류}(I_{DC}) &= \text{컨버터용량}(P_C) / \text{출력전압}(E_C) \\
 &= 2580\text{ kW} / 2800\text{ V} \\
 &= 921.4\text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

변압기 2차측 출력 용량(P_{TR})은 컨버터 용량(P_C)을 컨버터 효율(η_{CON})로 나눈다.

$$\begin{aligned}
 P_{TR} &= P_C / \eta_{CON} \quad (\text{kVA}) \\
 &= 2580\text{ kW} / 0.97 \\
 &= 2660\text{ kVA}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

변압기 2차측 전압은 입력 리액터의 입력단 전압으로서, 다음의 관계식을 통하여 계산할 수 있다.

$$E_s \times (27.5\text{kVA}/25\text{kVA}) \leq \sqrt{V_C^2 - V_L^2} \tag{6}$$

V_C : Converter Voltage = $E_C \times 0.82(m) / \sqrt{2}$ (Pr)

m : Modulation ratio

Pr: Peak voltage ratio

V_L : Reactance voltage = $2\pi fL \times I_s$

L : Secondary winding reactance = 0.5mH

$$E_s \leq \sqrt{V_C^2 - V_L^2} \times (25\text{kVA}/27.5\text{kVA})$$

$$E_s \leq 1465.9\text{ Vac}$$

따라서 컨버터 입력전압(변압기 2차측 전압)을 1400Vac로 하고 이때 컨버터 입력전류(변압기 2차측 전류)는 아래식을 통하여 계산할 수 있다.

$$P_{TR} = 2 \cdot E_s \cdot I_s \quad (VA) \tag{7}$$

위 식에서 $P_{TR} = 2660\text{kVA}$ 이고 $E_s = 1400\text{V}$ 이므로 컨버터 입력 전류(I_s)는 950A가 흐른다. 위에서 열거한 내용을 정리하면 표 2와 같다.

표 2 컨버터 사양

항 목	정 격
컨버터 용량	2580 kW
컨버터 출력전압(직류전압)	2800 V
컨버터 출력전류	921.4 A
변압기 용량	2660 kVA
컨버터 입력전류(변압기 2차측 전류)	950 A
컨버터 입력전압(변압기 2차측 전압)	1400 V

3. 컨버터의 동작 및 제어 특성

일반적으로 PWM 컨버터의 동작은 다음과 같다.

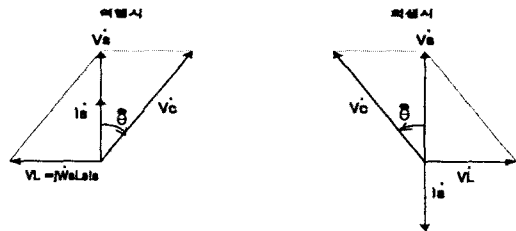


그림 2 수전단의 전압, 전류 벡터도

회생시와 역행시 수전단의 전압과 전류 벡터도를 표시하면 그림 2와 같고, 각 전압은 아래식을 만족하고 있다.

$$\dot{V}_s = \dot{V}_L + \dot{V}_C \tag{8}$$

또한 전원전류와 리액터 인가전압간에는 아래의 관계식이 성립한다.

$$I_s = \dot{V}_L / (j\omega L_s) \tag{9}$$

\dot{V}_s : 전원 전압

\dot{V}_C : 컨버터의 입력전압

\dot{V}_L : 교류 리액터에 인가 전압

I_s : 전원전류

이 벡터도에서 보듯이 컨버터의 입력전압은 역행시에는 전원 전압보다도 지상이 되고, 회생시에는 전상이 됨을 알 수 있다. 따라서 입력측 전류 요구치 I^* 에 대해 컨버터측 제어전압은 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{V}_C = V_m \cdot \angle \theta \tag{10}$$

$$V_m = \sqrt{(V_s^* - I^* \cdot R)^2 + (\omega L \cdot I^*)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{|\omega L \cdot I^*|}{|V_s - I^* \cdot R|}$$

이를 근거로 구성된 제어기는 그림 3과 같다.

먼저 주 출력전압과 입력전류제어로 스위칭주파수 제한으로 순시치제어보다 실효치제어방식을 채용하고 이에 대해 식 10에

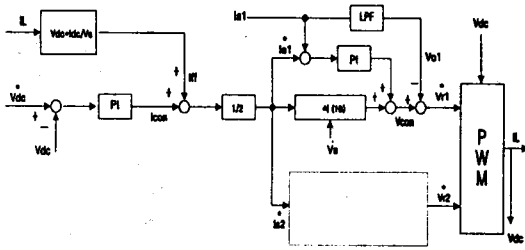


그림 3 병렬로 구성된 컨버터 제어 블럭도

의해 입력변압기의 임피던스 강하분을 계산하여 컨버터의 제어 전압을 발생토록 한다. 이와 병렬로 Steady-state error분을 보상하는 PI제어기가 부수적으로 수행된다. 이와 함께 입력 변압 기속의 편차 방지제어가 필요하게 된다.

철도차량의 경우에는 컨버터는 팬타그래프로 부터 전원을 공급받아 변압기를 통해 전원을 공급하여 직류전원으로 변환하는데, 팬타그래프의 순간적인 이선과 부하의 빈번한 변화는 주변압기의 1차측 전류의 교류 조건을 파기하여 변압기를 편자시게 된다. 이 현상은 2차 권선의 누설 인덕턴스가 감소되는 원인이 된다. 따라서 변압기와 컨버터간의 전류가 대단히 빠르게 증가되어 과전류 검출값에 도달하여 컨버터는 가동을 할수 없게 되므로 입력전류의 대칭제어를 위한 제어기가 필요하다.

컨버터의 출력전압은 전원 주파수의 2배에 해당하는 리플과 인버터주파수와 리플주파수차에 의한 리플전압을 가지게 된다. 이에 대한 인버터측은 물론 컨버터측도 입력전류의 왜율을 저감하기 위한 beatless제어가 필요하게 된다.

4. PWM 알고리즘

기존 철도차량에서 주로 사용한 PWM 방법은 구현하기가 비교적 간단한 삼각파 PWM 방식을 사용하여 구현하였으나 논문에서는 디지털에 의해 PWM을 구현하였다. 전류 제어를 통하여 출력하고자 하는 전압과 직류 전압과 비교하여 스위칭 시간을 결정하도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 Sa &= T_{on} = (V_{as}^*/V_{dc} + 0.5) \times T_s \\
 Sb &= T_{on} = (V_{bs}^*/V_{dc} + 0.5) \times T_s \\
 S &= Sa - Sb
 \end{aligned}$$

즉 스위칭 주기의 1/2주기마다 제어를 수행하여 동일한 스위칭 주파수에서 전류 제어의 속응성을 높임으로서 일정전압 제어의 속응성을 높일수 있도록 하였다.

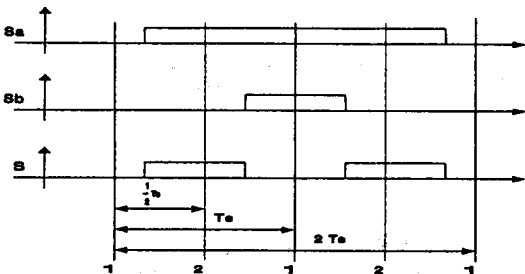


그림 4 PWM 변조 방법

컨버터 2대를 병렬운전할 경우는 스위칭주기의 1/4만큼 위상차를 두고 제어함으로써 전류의 리플 성분을 서로 상쇄하여 전 인축 전류 파형이 정현파에 근접하게 제어하였다.

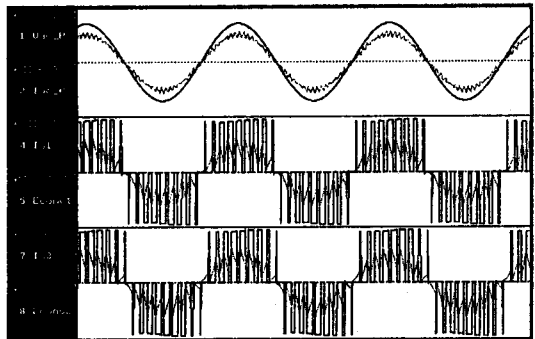
5. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 시뮬레이션은 컨버터 2대를 병렬운전하고 스위칭주기는 1.852msec로 하였으며, 전류제어는 전류 제어기는 스위칭주기에 두 번 수행하도록 하여 전류제어의 주기는 926 μ sec로 하였다. 시뮬레이션 조건은 아래와 같다.

시뮬레이션 조건

- 변압기 1차측 전압 : 25 [kV], 60 [Hz]
- (전압 변동 : 19kV ~ 27.5kV)
- 변압기 2차측 전압 : 1400 [V], 60 [Hz]
- 직류링크 전압 : 2800 [V]
- 입력 인덕턴스(Ls1) : 0.5 [mH]
- 직류 필터 캐패시턴스 : 16000 [μ F]
- 스위칭 주파수 : 540 [Hz]
- 부하 조건 : 무부하에서 역행 정격부하 (0 ~ 1290kVA/1대당)

Digital 시뮬레이션은 PWM 방법과 전류 및 전압 제어 특성을 검증하기 위해 수행되었다. 그림 5와 그림 6은 역행·회생 시 변압기 1차와 컨버터 I,II 입력 전압,전류 파형 및 FFT 분석 파형이다. 그림 7은 역행 및 회생시 부하변동 파형을 나타내고 있다. 시뮬레이션 파형에서 볼 수 있듯이 역행시 전압과 전류파형이 동상이 되고, 회생시는 역상이 되는 것을 볼 수 있다. 컨버터 I, II을 스위칭주기를 1/4만큼 위상차를 두어 제어함으로써 리플 전류가 줄어드는 것을 볼 수 있다.



(a) 변압기 1차, 컨버터 입력 I, II 전압 전류 파형

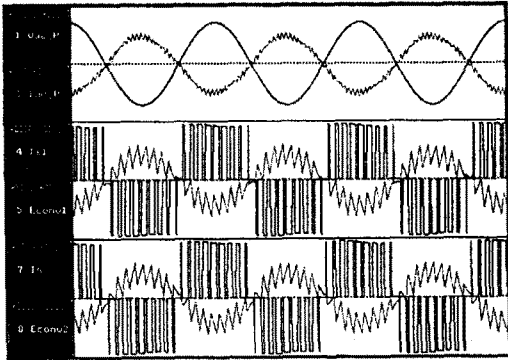


(b) 변압기 1차측 FFT 분석



(c) 컨버터 입력 전류 FFT분석

그림 5 역행시 시뮬레이션 파형(병렬운전)



(a) 변압기 1차, 컨버터 입력 I, II 전압 전류 파형

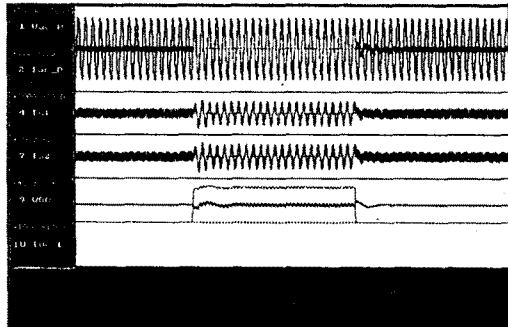


(b) 변압기 1차측 FFT 분석

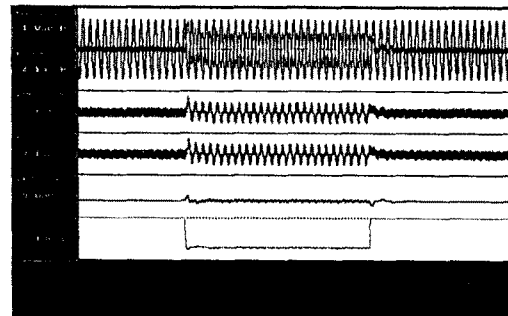


(c) 컨버터 입력 전류 FFT 분석

그림 6 회행시 시뮬레이션 파형(병렬운전)



(a) 역행시 제어특성



(b) 회생시 제어특성

그림 7 부하 변동시 시뮬레이션 파형

6. 결론

본 논문에서는 고속전철용 PWM 컨버터의 설계 내용과 제어원리, 병렬운전, 회생운전, 철도차량에 적용시 필요한 내용을 중심으로 시뮬레이션하였다.

컨버터 입력 전류가 전원 전압과 동상이 되게 제어할 수 있어 역행시 역률을 통상 1로 하는 것이 가능하며 회생제동시에 있어서도 마찬가지로 전압과 전류의 위상을 역상으로 하여 고역률 운전이 가능하였다.

차후 순간가선이선과 부하 비대칭변동시 대한 입력 변압기측의 편자제어와 입력측 고조파 문제에 대한 보완 연구가 필요하리라 본다.

참고 문헌

- [1] H. Sugimoto, S. Morimoto and M. Yano, "A High Performance Control Method of a Voltage Type PWM Converter", in PESC Rec., 1983, pp.360-368
- [2] E. Wernekink, A. Kawamura and R. Hoft, "A high frequency AC/DC converter with unity power factor and minimum harmonic distortion", IEEE PESC Rec. 1987, pp. 264-270
- [3] K. Huckelheim, Ch. Mangold, ABB, "Novel 4-Quadrant converter control method", EPE, 1989, pp. 573-576.
- [4] Hiroshi Hata, Author, Kosuke Aburaya, Co-Author, Railway Technical Research Institute, Japan Railways, "Development of a PWM Converter and Inverter device for Shinkansen EMU", EPE, 1989, pp. 589-592.
- [5] 이오재, 이동춘, 설승기, 서울대, "단상 GTO PWM 컨버터의 직류링크 전압 제어"
- [6] S.S. Min, J.D. Cha, S.W. Hong, S.W. Kim, Y.C. Park, J.H. Kim, "Development of single phase PWM converter for AC traction system", '94대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 21-23