

# 차세대 고속전철용 보조전원장치용 PWM 컨버터에 대한 연구

(A Study on PWM Converter of Auxiliary Power Block for Next Generation High Speed Train)

정한정 · 차길로 · 이원철 · 원중연

(Jeong-Han Jeong · Gil-Ro Cha · Woncheol Lee · Chung-Yuen Won)

## Abstract

This paper gives a description of the modeling and control of a single phase PWM(Pulse Width Modulation) converter for HEMU-400X(High-speed Electric Multiple Unit - 400 km/h experiment). The converter is part of a Auxiliary power unit supplied by the 25[kV], 60[Hz] overhead line. A model of the converter in a synchronously rotating reference frame of coordinates is used to develop a new type of control. The control system has separate controllers for the active and reactive current, permitting the free choice of the power factor. This paper proposes a new control method of PWM converter for Auxiliary power unit.

## 1. 서론

1990년대 중반부터 시작된 고속전철 기술 개발 사업의 성공으로 우리나라 철도 기술을 혁신적으로 발전시키는 계기가 되었다. 정부의 능동적인 국가 정책사업의 결과 최근 철도 선진국의 고속화의 기술을 받아들여 독자적인 개발 능력을 가지게 되었다. 한국형 고속철도 속도가 350[km/h]까지 성공적으로 개발되어 현재 운행 중이다.

그러나 고속 열차의 독자적인 개발 능력을 보유한 철도 선진국들도 신기술의 고속열차를 개발하고 속도향상을 위한 연구에 지속적인 투자를 하고 있으며, 또한 국내외적으로 신규 고속철도 건설이 이루어지고 있다. 이에 정부는 2007년부터 차세대 고속전철 기술개발 사업을 착수하였다.[1]

인력을 얻는 주 전력 변환장치와는 별도로 각종 제어 장치 및 승객 서비스 장치에 전원을 공급하는 역할을 한다. 따라서 보조 전원 장치의 이상은 승객 편의 시설 및 주 전원 장치 등의 제어 전원 등에 고장으로 이어져 열차의 운행에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이런 측면에서 보조 전원 장치의 역할은 매우 중요하고 높은 신뢰성을 요구한다.[1][2]

그림 1은 현재 고속전철에 사용 중인 보조 전원 장치의 구성을 나타내었다. 교류전원 25[kV]를 보조 전원장치에서 사용할 수 있는 전압으로 강압시키기 위한 변압기와 강압된 교류전원을 직류전원으로 변환시키기는 AC/DC 컨버터, 직류를 교류로 변환시키는 인버터로 구성되었다.

기존의 고속 전철은 대 전력의 AC/DC 변환에는 주로 전력회로가 간단하고 동작이 안정한 Thyristor 위상 제어 정류기가 주로 사용되어 왔다. 그러나 Thyristor 위상제어 정류기는 제어가 간단한 반면 다량의 고조파를 함유함으로써 주 전력계통에 악영향을 미치고, 통신장애를 일으키는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 정격용량의 증대가 이루어지고 있는 IGBT소자를 이용한 PWM 컨버터를 이용하여 전원 측에서 문제시 되고 있는 고조파 저감 및 전원 측의 무효 전력 분담을 줄이기 위하여 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 구분하여 단위 역률 제어를 하고자 한다.

본 논문에서는 IGBT 소자로 구성된 PWM컨버터를 구현하고, PWM 컨버터의 고조파 및 역률제어의 구현 및 이를 증명하기 위해 시뮬레이션을 통하여 본문에서 제시한 설명에 대한 타당성을 확인하고자 한다.

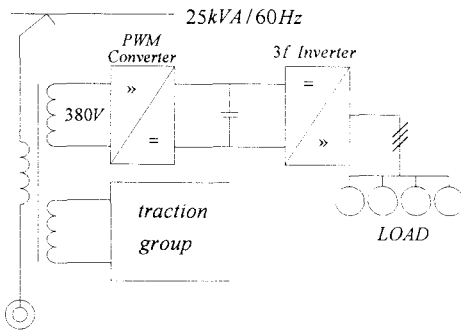


그림 1. 보조전원장치  
Fig. 1. The auxiliary power unit

보조 전원 장치(Auxiliary Power Unit)는 열차의 전

## 2. 본 론

### 2.1. PWM 컨버터 전력회로

고속 전철용 SIV 전압형 PWM 컨버터는 단위 역률과 사인파 전류를 유지하기 위해 사용된다. 즉, 제안된 PWM 컨버터 제어방식으로 입력 전류의 파형을 개선시킬 수 있으므로 전원 측으로 유입되는 고조파를 저감시킴으로써 EMI나 통신선장애의 영향을 줄일 수 있다.[3]

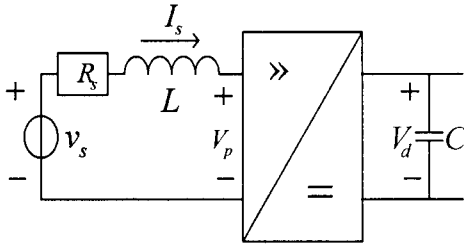


그림 2. 단상 PWM 컨버터 모델  
Fig. 2. Model of the single phase PWM converter

그림 2는 단상 PWM 컨버터를 간략화한 모델이다. 이 그림에서,  $V_s$ 는 line-side 변압기의 2차 측에서 무부하 전압이다. 2차 측 저항이  $R_s$ 에 의해 나타나는 반면, 변압기의 2차 측 누설 인덕턴스는  $L_s$ 에 의해 나타나게 된다. 그림 2에 나타난 단상 PWM 컨버터 모델로부터 전압방정식을 세우면 식 (1)과 같다.[4]

$$v_s - v_p = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (1)$$

식 (1)은 정좌표계에서만 유효하다. 이 방정식을 회전좌표계로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$\vec{v}_s - \vec{v}_p = R_s \vec{i}_s + j\omega_s L_s \vec{i}_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} \quad (2)$$

전류 벡터  $\vec{i}_s$ 와 전압 벡터  $\vec{v}_s, \vec{v}_p$ 는 전원 주파수 60[Hz]로 회전한다. 전원 주파수를 60[Hz]로 선택함으로써 동기 회전 좌표계의 회전 속도  $\omega_s = 60 \times 2\pi = 120\pi$  [rad/s]로 회전하기 때문에 전압과 전류 성분은 DC 성분이 된다.

본 논문의 PWM 컨버터 제어 방식에서 다루고 있는 전역 통과필터의 주요 목적은 입력 전압의 위상을 90도 위상차를 갖게 하여 가상의 무효전력 축을 구현한다.

그림 3에서 유효전력 성분은 d축으로 나타내고 무효

전력 성분은 q축으로 나타내었다.

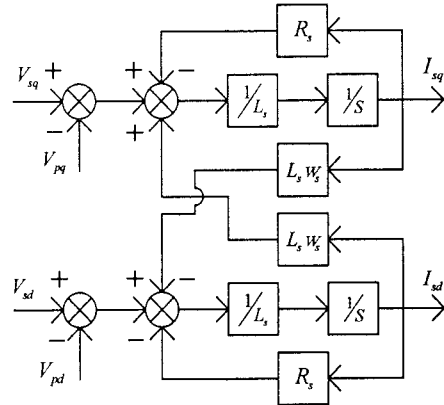


그림 3. 동기좌표계에서의 PWM 컨버터 모델  
Fig. 3. Model in a moving reference frame of coordinates

### 2.2. 스위칭 방식

PWM 컨버터 스위칭 제어 방식은 2-레벨 스위칭 방식과 3-레벨 스위칭 방식으로 나뉜다. 3-레벨 스위칭 방식은 단락모드가 있어 출력 전압이  $\pm V_{dc}, 0$ 의 3-레벨이 나타나지만, 2-레벨 스위칭 방식은 단락 모드 없이 출력 전압이  $\pm V_{dc}$ 의 2-레벨이 나타난다.

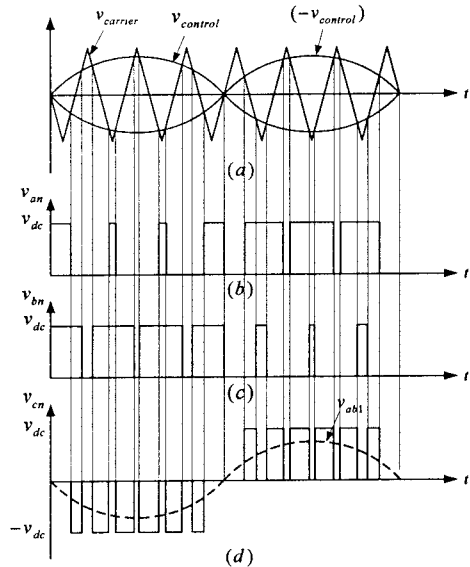


그림 4. 3-레벨 스위칭 방식  
Fig. 4. Method of the 3-level switching

2-레벨 스위칭 방식은 구현이 용이하고 DC 링크전압을 이용하기 때문에 입력전류의 지령 값의 변동에 신속히 응답하지만 스위칭 손실이 증가하고 DC 링크에 전

달되는 전류에 높은 고조파 성분이 포함되는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서 사용된 3-레벨 스위칭 방식은 삼각파를 이용한 일정 주파수 전류 제어가 가능하여 2-레벨 스위칭 방식보다 높은 스위칭 주파수를 얻을 수 있고 입력 전류의 리플이 감소되어 인덕터의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다.

### 2.3. 제어 방식

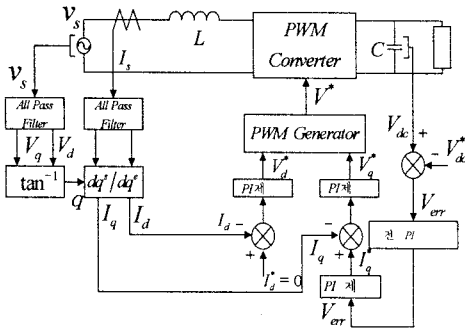


그림 5. PWM 컨버터의 제어블록도  
Fig. 5. Control block of PWM converter

PWM컨버터의 AC 전류제어기는 순간적인 부하변동이 있더라도 AC전류 추종에 대한 위상과 오차를 줄여야 한다. 일반적으로 컨버터 제어기는 내부루프에 전류 제어기, 외부루프에 전압제어기가 있는 이중루프의 구조로 되어있다. 즉, DC 출력 전압제어를 위한 PI제어기, 입력전류를 입력전압과 동상인 정현파로 제어하는 전류 제어기로 구성된다.

입력 측에서 센싱받은 전압  $V_s$ 는 전역 통과필터를 거쳐서 가상의 무효전력성분  $V_{ds}$ 를 생성한다. 유효전력 성분  $V_{qs}$ 와 무효전력성분  $V_{ds}$ 로 동기회전각  $\theta$ 를 추출한다. 이 정보를 이용하여 입력전류를 유, 무효 전류성분으로 분리하여 각각 따로 제어한다.

### 2.4. 시뮬레이션

그림 6은 본 논문에서 다루고 있는 고속전철용 보조 전원장치용 PWM 컨버터의 회로도이다. 350[kVA] 으로 설계 하였으며 입력 단에 부스트 인덕터를 추가 하였다.

표 1은 시뮬레이션 사양과 사용된 소자들의 파라미터를 나타낸다. 표 1의 값들을 PWM 컨버터 회로(그림 6)에 대입하여 구할 수 있다.

그림 7은 d-q변환을 통하여 얻게 된 각 축의 전류 파형을 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameter

입력전압	$v_s$	AC 380 [V]
출력전압	$V_o$	DC 670 [V]
입력리액터	$L$	0.45 [mH]
출력커패시터	$C$	14069 [ $\mu$ F]
스위칭주파수	$f_s$	1 [kHz]
리플율	$\Delta V_o$	$\pm 1.5$ [%]

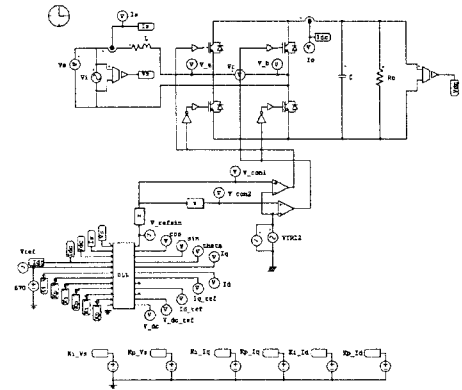


그림 6. PWM 컨버터의 회로도  
Fig. 6. PWM converter schematic

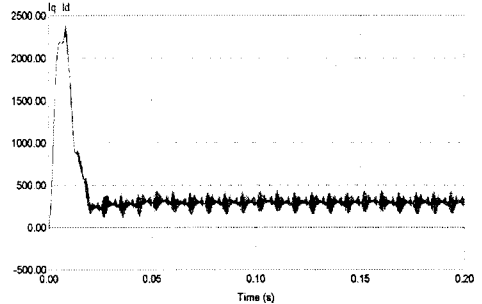


그림 7. d축, q축 전류  
Fig. 7. Waveform of d-q axis currents

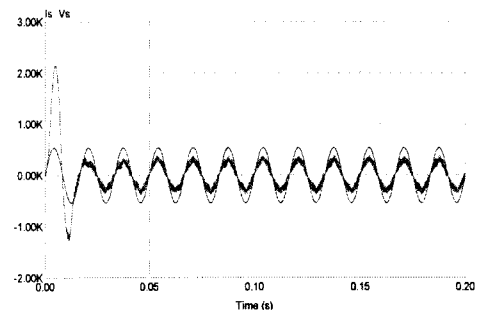


그림 8. 입력전압과 전류 파형  
Fig. 8. Input voltage and current waveforms

전압  $V_s$ 가 전역 통과필터를 거쳐 가상의 d축 전압을 만들어 낸다. d-q변환을 사용하는 가장 큰 목적은 보다 제어하기 쉬운 전압을 만들어 내기 위한 것이다.

그림 8은 PWM 컨버터의 입력 전압과 전류 파형이다. 입력 전압과 전류가 동상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 파형이 동상을 이루면 역률은 개선되어 1에 가깝게 제어 된다.

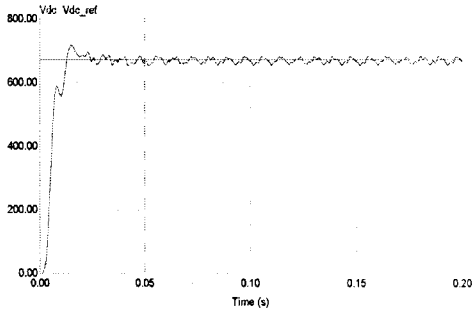


그림 9. 출력전압 기준값과 출력전압 파형  
Fig. 9. output voltage and reference waveforms

그림 9는 출력전압의 기준값에 따른 출력전압의 파형을 나타낸다. 기준값을 기준으로 출력전압 파형이  $\pm 1.5\%$  정도 리플을 갖는다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 차세대 고속전철용 보조전원장치용 PWM 컨버터에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 기존의 단상 PWM 컨버터에 3레벨 스위칭 방식을 사용하여 입력 전류의 리플의 감소와 보다 높은 스위칭 주파수를 얻을 수 있었다. 또 입력측에 사용된 전역통과필터로 인해 d-q 전류 제어 방식을 사용하여 단위역률 제어가 개선됨을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 송상훈, 김연충, 원충연, 최종목, 기상우, 배기훈, "단상 PWM 컨버터의 고조파 저감에 관한 연구", 대한조명전기설비학회 학술대회 논문집, pp.162~167, 1999.
- (2) 송상훈, 성재원, 김연충, 원충연, 최종목, 기상우, "고속전철 보조전원장치용 PWM 컨버터의 병렬운전에 관한 연구", 전력전자학회 하계 학술대회 논문집, pp.358~361, 1999
- (3) 조현욱, 김연충, 김태환, 장경현, 최종목, "고속전철용 보조 전력변환장치 1, 2군 동시 기동", 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp. 1620 ~ 1626, 2007. 11.
- (4) W.A.G. de Jager, G.H. Tubbing "A vector oriented control strategy for a 4-quadrant line side converter", Fifth