

# 동력분산형 고속철도의 변압기 및 컨버터 스위칭 성능 개선 연구

## Study on Improving the Performances of Transformer and Convertor Switching Used for the High-Speed EMU

박병건\*  
Park, Byoung-Gun

현동석\*\*  
Hyun, Dong-Seok

---

### ABSTRACT

In this research, studied were performance improvements of the power conversion system for the high speed EMU. The object of this research is separated into two parts ; the one is the analysis of the designed transformer and the other is the switching improvement of a parallel PWM converter. The multi-outputs of a transformer must be balanced. However, the output of transformer is interfered and unbalanced in practical operation. To solve these problems, the electromagnetic analyzing model of a transformer is used to minimize the output interference. Also, the improvement of converter switching can reduce the unbalanced output and harmonics.

---

### 1. 서 론

최근 고속전철 시스템의 기술은 프랑스의 TGV를 기본으로 한 동력 집중식 계열의 차량이 스페인과 한국에 수출하여 상업화에 성공하였고 계속하여 발전할 것으로 예상되었으나, 독일 Siemens사의 ICE3를 기본으로 한 동력분산형 차량이 스페인 2세대 고속열차 도입계약, 중국의 고속철도 차량 도입, 러시아의 고속철도 해외차량 도입 계약 등 지속적으로 성장하고 있다. 따라서, 국내 고속 철도 기술개발을 위해 현재 개발된 한국형 고속열차의 지속적인 성능 개량과 세계적인 기술발전 경향을 분석하고 국내외 시장 특징을 고려한 차세대 고속열차 기술의 개발이 필요하다[1-3].

본 연구의 개발 내용은 두 가지로 요약될 수 있으며, 첫 번째로 변압기의 특성 해석 및 개선에 관한 것이다. 고속철도의 변압기는 복수개의 출력을 가지며, 병렬로 구성된 컨버터에 전력을 공급하는 역할을 한다. 변압기 출력은 복수개의 출력이 동일함을 요구하나, 실제 운전조건에서는 출력간의 불평형 현상이 발생하고, 출력 단 임피던스의 간섭현상이 일어나서 병렬 컨버터의 특성이 제대로 나타나지 않는다. 두 번째로는 변압기에서 출력된 교류 전압을 컨버터단의 스위칭을 통하여 직류전압으로 변환하며 이를 이용하여 3상의 전동기를 구동하는 역할을 하는 컨버터의 스위칭 특성 해석 및 개선에 관한 것이다. 정류단 PWM 컨버터는 스위칭 소자의 용량 및 입력단의 고조파 성분 제거를 위하여 복수개를 병렬 운전한다. 또한 컨버터는 4상한 운전에 의하여 차량의 제동 혹은 경사로 운전 시 전동기로부터 회생되는 에너지를 전원 측으로 회생시켜 시스템의 에너지 효율을 높이는 역할을 한다. 따라서 병렬 운전에 따른 입력단의 간섭 현상 최소화 기법 및 스위칭 알고리즘의 개선을 통하여 전력 회생 성능 향상 및 시스템의 신뢰성 향상을 연구하고자 한다.

---

\* 한양대학교 전기공학과 박사과정, 정회원  
E-mail : redalarm@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0341 FAX : (02)2220-0570

\*\*한양대학교 전기공학과 교수, 정회원

본 논문에서는 변압기 특성 해석 및 컨버터 스위칭 개발에 대한 연구의 기본적인 연구진행 방향과 목표를 소개하고 현재 진행되고 있는 연구의 내용에 대한 개념적인 설명을 하고자 한다. 또한, 컨버터 스위칭 특성에 대한 연구를 위해 진행 중인 컨버터 토폴로지 및 승압용 인덕턴스 변화에 따른 컨버터의 출력 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

## 2. 변압기 특성 해석 및 컨버터 스위칭 개발

### 2.1 변압기 특성 해석

변압기의 누설 인덕턴스는 시스템의 경량화를 위하여 단상 컨버터의 승압용 인덕터로 이용되어 진다. 누설 인덕터의 값이 클수록 고조파의 함량이 낮아지나 변압기의 크기 중량 등이 증가하는 문제가 있으며, 인덕터의 값이 낮게 되면 전류 리플의 증대 및 고조파가 증가하는 영향이 나타난다. 변압기의 누설 인덕터를 시스템에 적절한 값을 얻기 위해서는 변압기 특성 해석 및 설계에 대한 기술이 요구되어 진다. 본 연구에서는 이러한 변압기의 누설 인덕턴스 값을 적절히 유지하기 위해 자계해석 시뮬레이션 프로그램인 Maxwell3D를 이용하여 3차원 변압기 자계 해석 시뮬레이션 모델을 개발하고 개발된 모델을 통한 변압기 설계에 대한 검증은 보다 쉽게 가져가고자 한다.

### 2.2 컨버터 스위칭 개발

현재 추진되고 있는 고속 전철용 주전력 AC/DC 변환 장치로는 아래에 보인 그림 1과 같이 승압형 4상한 단상 PWM 컨버터의 병렬운전을 사용한다. 스위칭 소자로는 IGBT를 사용하고, Free-wheeling 다이오드와 교류 리액터로 컨버터 시스템이 구성된다. 컨버터의 출력 단에는 부하에 직류 전압을 제공하기 위한 대용량 커패시터가 연결되어 있다. 주 전력변환 장치의 구조는 2-level 병렬 컨버터 시스템과 3-level 구조의 컨버터 시스템을 구성할 수 있다. 2-level 컨버터 시스템은 변압기의 2차측 권선이 두 개로 분리되어 각각의 단상 PWM 컨버터에 연결된다. 이 시스템의 경우 변압기의 누설 리액턴스 값이 각 권선에 따로 공급되어 이용되기 때문에 변압기의 설계에 대한 비중이 3-level 컨버터 시스템에 비해 복잡하고 중요하며, 두 권선간의 임피던스 값의 변화에 의해 출력간의 간섭과 불평형이 발생한다. 하지만, 컨버터 제어의 용이성과 스위치에 대한 비용의 감소를 가져올 수 있는 장점을 가지고 있다 [4-5].

단상 PWM 컨버터의 병렬운전은 시스템의 용량을 고용량화하고, 시스템의 안정성을 높일 뿐만 아니라, 입력단 전류의 고조파를 저감하기 위하여 컨버터를 병렬로 운전한다. 즉, 2대의 단상 PWM 컨버터가 하나의 DC-Link에 병렬로 연결되어 3개의 독립된 모듈을 구성하게 된다.

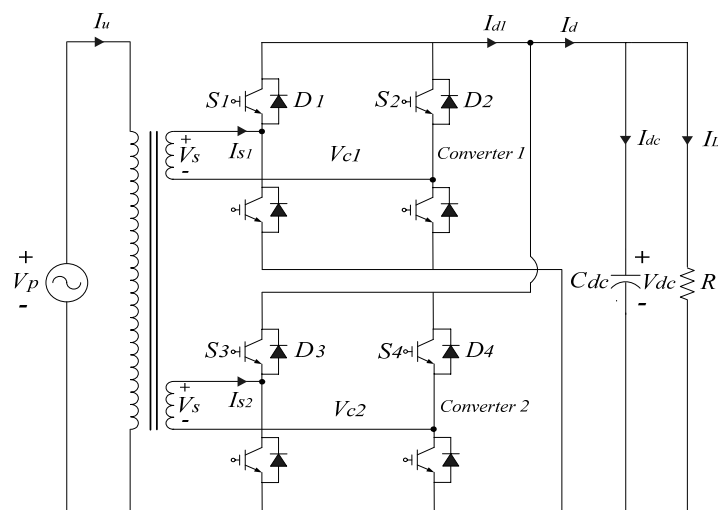


그림 1. 2-level PWM 컨버터 시스템

병렬 운전시 스위칭 시점에 차이를 둬으로써 유효 스위칭 주파수를 증가시키면서 동시에 입력 전류의 고조파 성분들을 저감시키는 방안이 필요하다. 이것을 일반적으로 interlacing 기법이라 한다. 이것은 n개의 컨버터가 병렬 운전할 때에 각 컨버터의 삼각파 위상이 서로  $\pi/n$ 만큼 위상차가 나게 배치하는 것으로, 이를 통해 각 컨버터의 입력 전류의 상승구간 및 하강 구간이 서로 interlacing 됨으로써 전체 입력 전류의 파형을 정현파에 가깝게 개선시킬 수 있다[6].

### 3. 간섭 최소화 기법

변압기의 2차 권선은 견인전동기의 전원을 공급하는 견인 권선인 컨버터의 입력에 사용되는 권선과, 철도내의 각 보조기에 전원을 공급하는 보조권선으로 구성된다. 변압기에는 임피던스 보상용이나 고조파 또는 와전류 제한용 리액터권선이 내장되어 있으며, 다중출력을 가지므로 인해 출력의 불평형이 발생하고 이로 인해 설계된 용량만큼 출력을 발생하지 못하여 변압기 출력의 이용률이 낮아진다. 또한, 각 권선의 임피던스가 동일하지 않은 경우 주 전력변환기기의 제어에 잘 이루어지더라도 변압기의 1차 측에 전류왜곡 현상이 발생한다. 따라서 변압기의 임피던스 간섭 개선 및 출력 불평형 개선에 의한 컨버터의 제어 향상이 요구된다. 병렬 운전 시 출력 간섭현상을 분석하기 위해 그림 2와 같이 병렬 운전 시스템의 등가회로를 구성할 수 있다.

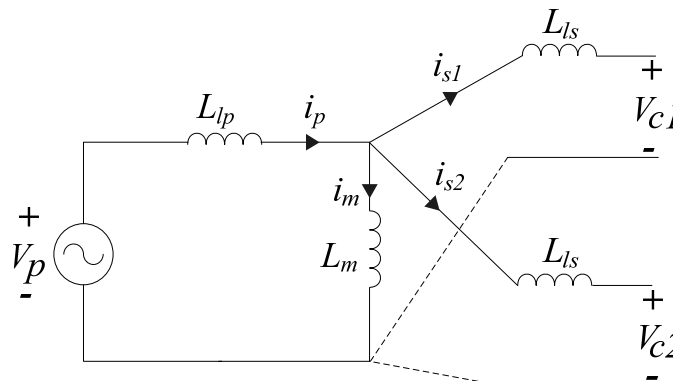


그림 2. 병렬 단상 PWM 컨버터의 등가회로

입력과 출력 전압은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_P = L_{lp} \frac{di_p}{dt} + L_m \frac{d(i_p - i_{s1} - i_{s2})}{dt} \quad (1)$$

$$V_{c1} = -L_{ls1} \frac{di_{s1}}{dt} + L_m \frac{d(i_p - i_{s1} - i_{s2})}{dt} \quad (2)$$

$$V_{c2} = -L_{ls2} \frac{di_{s2}}{dt} + L_m \frac{d(i_p - i_{s1} - i_{s2})}{dt} \quad (3)$$

컨버터 1과 컨버터 2의 스위칭 함수를  $s_1, s_2$  라고 하면 컨버터의 입력전압은 다음과 같이 나타난다.

$$V_{c1} = s_1 V_{DC} \quad (4)$$

$$V_{c2} = s_2 V_{DC} \quad (5)$$

변압기의 2차측 누설 인덕턴스 값이 동일하다고 가정하였을 때, 입력 전류는 다음과 같다.

$$\frac{di_{s1}}{dt} = \frac{1}{L} [(L_m L_s - L_m^2) V_P - (L_p L_s - L_m^2) s1 V_{DC} + (L_m L_p - L_m^2) s2 V_{DC}] \quad (6)$$

$$\frac{di_{s2}}{dt} = \frac{1}{L} [(L_m L_s - L_m^2) V_P - (L_m L_p - L_m^2) s1 V_{DC} + (L_p L_s - L_m^2) s2 V_{DC}] \quad (7)$$

여기서,

$$L_s = L_{ls1} + L_m = L_{ls2} + L_m$$

$$L_p = L_{lp} + L_m$$

$$L = L_s^2 L_p - (2L_s + L_p) L_m^2 + 2L_m^3$$

이다.

식(6)과(7)의 입력 전류  $i_{s1}$ ,  $i_{s2}$  는 각각의 컨버터 스위칭 함수에 독립적이지 못하고, 다른 컨버터의 스위칭 상태의 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. 식(6)의  $i_{s1}$  은  $s1$ 과  $s2$ 에 의해서 영향을 받게 되는데, 이 상호 간섭항을 전향적으로 보상하여 2차 측의 결합 효과를 제거하는 것이 가능하다. 식(6)의 우변의 제 2항의 식은 식(8)과 같이 정리 할 수 있다.

$$L_p L_s - L_m^2 \cong L_m (L_{lp} + L_{ls}) \quad (8)$$

여기서 1차측과 2차측 누설 인덕턴스가 같다고 가정하면 식(9)와 같이 정리된다.

$$L_p L_s - L_m^2 \cong 2L_m L_{lp} \quad (9)$$

또한, 식(6)의 제 3항은 동일한 가정에 의해서

$$L_m (L_m + L_p) - L_m^2 \cong L_m L_{lp} \quad (10)$$

된다.

따라서, 이를 전향적으로 보상함으로써 두 컨버터의 상호 비간섭 제어를 피할 수 있다. 전향적으로 보상해야 할 두 컨버터 전류제어기의 입력을  $K$ 로 표시하였고, 그 값은 다음 식(11)과 같다.

$$K = \frac{L_{lp} L_{ls} + L_{lp} L_m + L_{ls} L_m}{L_m (L_{ls} + 2L_{lp})} \quad (11)$$

1차측과 2차측 누설 인덕턴스 값이 동일하고, 두 인덕턴스의 값이 무시할 만큼 작다고 한다면 전향 보상을 위한 전류 제어기 입력값은 약 2/3으로 나타난다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

기본적인 PWM 컨버터 토폴로지의 제어 특성에 대한 분석을 위해 2-level 병렬 컨버터의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 툴은 Psim을 사용하였다.

##### 4.1 단상 PWM 컨버터 병렬운전

그림 3과 같이 단상 PWM 컨버터의 병렬 운전은 Conv1과 Conv2에 대하여 90도 위상차를 주는 방식의 PWM 기법을 사용하였다. PWM 제어 기법은 Sine PWM 방식을 이용하였고 스위칭 주파수는 540kHz이고, 스위칭 기법은 각 컨버터를 90도 Delay를 주고 입력 전압 220 Vac에서 출력 전압 600 Vdc 이 나타나도록 제어하였다.

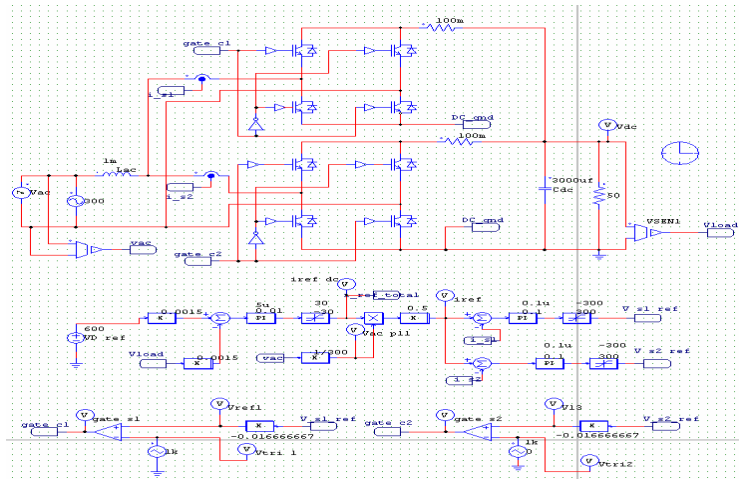


그림 3. 병렬 PWM컨버터 시뮬레이션 구성도

그림 4는 병렬 PWM 컨버터의 출력 파형을 보여준다. 출력 전압이 600Vdc로 제어가 잘 이루어지고 있으며, 컨버터의 입력 전압과 전류가 동상을 유지하며 역률제어가 1로 잘 유지되는 것을 확인할 수 있다.

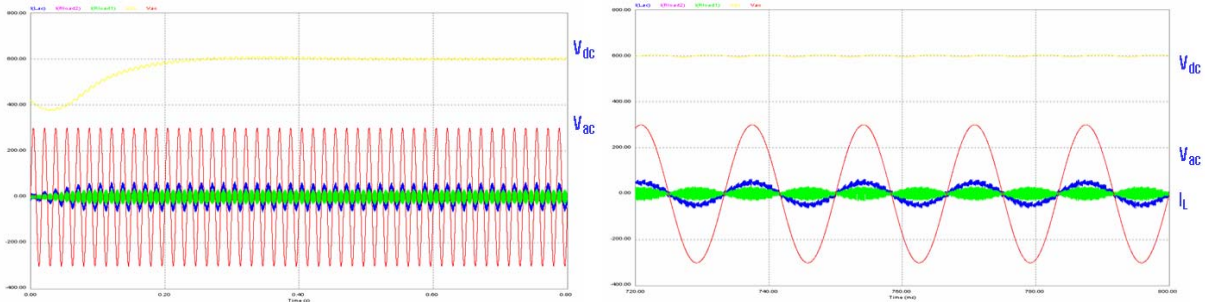
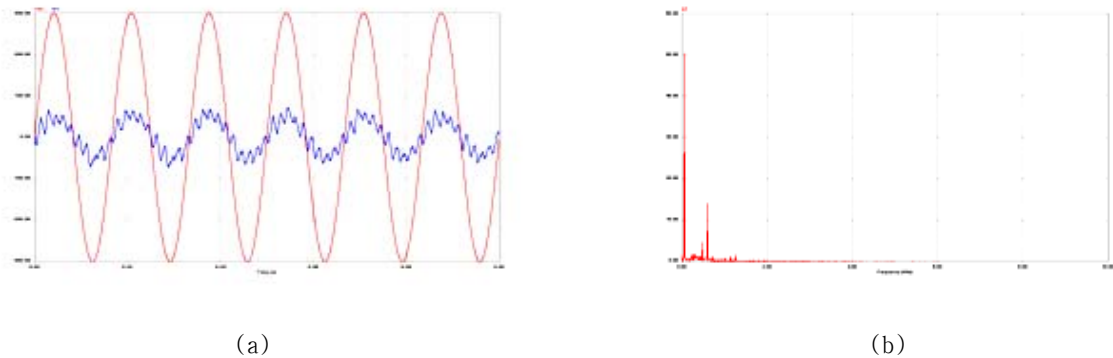


그림 4. 병렬 컨버터의 출력 특성

#### 4.2 변압기의 누설 인덕턴스 변화에 대한 단상 PWM 컨버터 병렬운전

변압기의 누설 인덕턴스의 영향을 확인하기 위해 변압기가 결합된 컨버터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5부터 7은 변압기의 누설 인덕턴스 값의 변화에 대한 병렬 컨버터의 출력 파형을 보여준다. 각각의 변압기의 누설 인덕턴스 값은 0.2mH, 0.8mH, 1mH 이다.



(a)

(b)

그림 5. 변압기의 누설 인덕턴스가 0.2mH 일때의 특성 파형

(a) 컨버터 입력 전압과 전류 (b) 입력전류의 고조파 분석

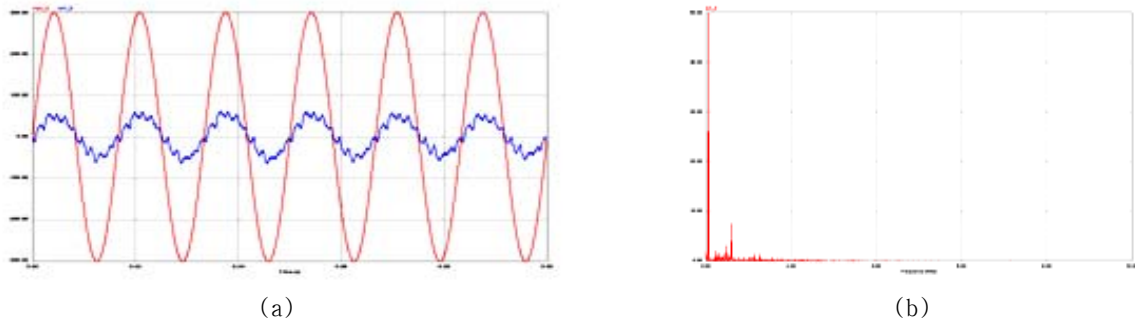


그림 6. 변압기의 누설 인덕턴스가 0.8mH 일때의 특성 파형  
(a) 컨버터 입력 전압과 전류 (b) 입력전류의 고조파 분석

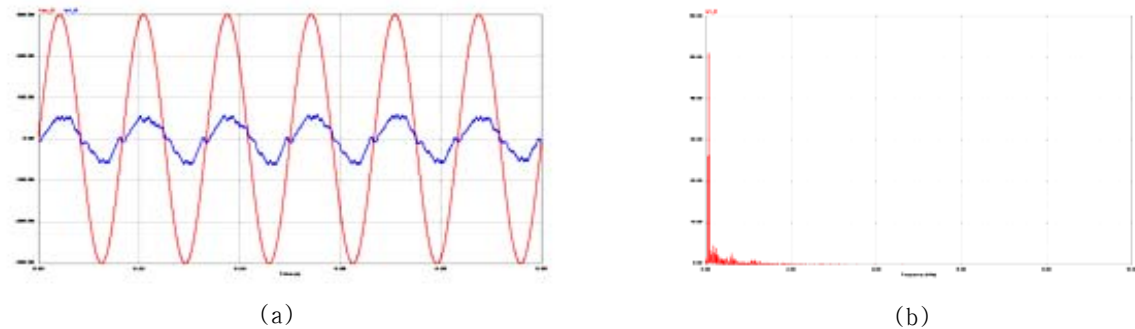


그림 7. 변압기의 누설 인덕턴스가 1mH 일때의 특성 파형  
(a) 컨버터 입력 전압과 전류 (b) 입력전류의 고조파 분석

변압기의 누설 인덕턴스 값이 증가함에 따라 입력 전류의 리플이 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 리플의 감소에 의한 입력 전류의 고조파가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

동력분산형 고속철도의 변압기의 복수 개 출력은 평형 되어야한다. 하지만, 실제 운전조건에서는 변압기의 설계에 의한 인덕턴스 값이 정확히 나타나지 않으면, 출력은 불평형되고 간섭현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 변압기의 전자계적 해석 모델을 통하여 변압기 설계를 간단히 하며, 컨버터의 스위칭 기법을 통하여 출력 간섭현상을 최소화하여 불평형된 출력과 고조파를 저감시키기 위한 방법을 찾고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(차세대 고속철도기술개발, 07 차세대 고속 I-2 세부 8과제)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 주변압기개발, 2단계 1차년도 연차보고서, 건설교통부, 2000.
- [2] 세계 각국의 고속전철 시스템의 현황분석, 1996.
- [3] 철도기술 선진화 연구기반 조성, 철도기술 발전 전략수립을 위한 기술지도 작성, 철도기술연구원, 2006.
- [4] J. Shen, et al., "Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters," IEE proc. Electr. Power Appli. vol. 144, no. 2, pp.158-168, 1997.
- [5] O. Stihl and B. T. Ooi, "A single phase controlled current PWM rectifier," IEEE Trans. on Power Elect., vol 3, no 4, pp. 453-459, 1988.
- [6] 박정배 외, "고속 전철용 단상 PWM 컨버터의 고조파 저감에 관한 연구," 전력전자 학술대회, pp. 5-9, 1998.