

경제성을 고려한 보조전원장치의 컨버터 입력전압 추정을 위한 제어기 설계

A Controller Design for SIV with Converter Derived Input Voltage for Consideration Economic Efficiency

김재문*
Kim, Jae-Moon

안정준**
Ahn, Jeong-Joon

ABSTRACT

The single-phase PWM converter employing power semiconductors is currently applied to the power unit of high-speed rail vehicle and increasingly used as the front-end converter with properties of near unity power factor. Power factor and harmonics are increasingly important needs for drive system of high-speed rail vehicle. The proposed approach has many advantages which include fewer semiconductor components, simplified control, high performance features and satisfies IEC 555 harmonic current standards.

Simulation results show that the dc-link voltage control obey the reference value during constant load and input current is near sinusoidal.

1. 서 론

국내 고속철도 차량이 도입됨에 따라 철도차량의 고속화, 첨단화 등과 관련한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 철도차량의 고속화는 차량이 경량화에 초점이 맞추어져 있으며 이를 위해 차량에 탑재된 전력변환 장치의 전력 고품질화 및 이를 구현하기 위한 다양한 토폴로지가 제시되고 있다.

승객의 편의를 제공하기 위한 보조전원장치인 경우 전차선 교류전압을 직전장치인 팬터그래프를 통해 차량내의 주변압기 1차측에 공급되는데, 변압기 2차측에 교류를 직류로 변환시키는 컨버터장치가 있다. 일반적으로 다이오드 정류회로를 통해 직류를 교류로 변환시키거나 4개의 스위치를 사용한 4상한 PWM컨버터, 혹은 다이오드 정류회로를 거친 후 승압을 시키는 컨버터 등이 토폴로지가 있다. 이를 구현하기 위한 단상 PWM컨버터인 경우 역률과 고조파를 보상하도록 동작하기 위해서는 입력전압 및 전류 그리고 출력측 직류전압을 검출하기 위한 3개의 검출기가 필요하다. 그러나 입력전압의 경우 검출기로 직접 측정하지 않고 나머지 2개의 검출기로 측정된 값으로부터 이론적으로 추정이 가능하다.

본 논문에서는 입력전압 검출기가 없이 입력전류 및 출력측 직류전압을 통해 입력전압을 추정할 수 있는 제어기를 설계하였다. 제안하는 제어기의 성능분석을 위해 시뮬레이션을 실시하여 제안된 방법의 타당성을 입증하였다.

* 한국철도대학, 철도차량전기과 교수, 정회원

E-mail : goldmoon@krc.ac.kr

TEL : (031)460-4612 FAX : (031)462-2944

** 기술보증기금

2. 본 문

2.1 혼합형 단상 PWM 컨버터를 위한 제어 시스템

고속철도차량 및 도시철도차량의 보조전원장치는 에너지를 회생하지 않으므로 주변압기 2차측에 단상 다이오드 정류회로를 이용하여 전력변환을 하거나 승압형 형태의 컨버터를 사용되고, 4개의 스위칭 소자를 사용하는 PWM 컨버터인 경우 에너지를 회생하기 위해 추진제어시스템에 적용된다. 경부선에 운행 중인 고속철도차량(KTX)인 경우 입력 역률을 개선할 수 있으며, 동시에 정현파에 가까운 전류 파형을 입력측에서 얻을 수 있는 점과 두 개의 반도체 소자만을 사용함으로써 승압형 초퍼에 의한 방식과 비교하여 전압강하를 줄일 수 있는 장점으로 인해 그림 1과 같은 전력회로를 적용하고 있다.

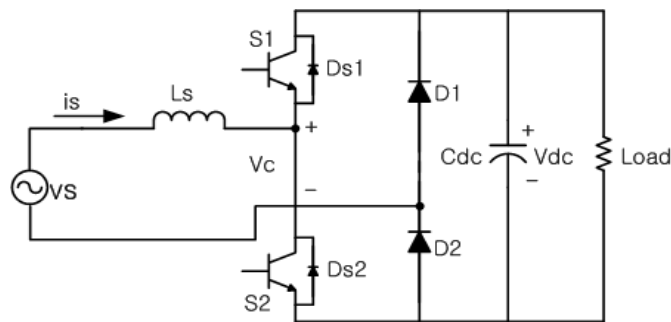


그림 1. 혼합형 단상 PWM 컨버터

표 1. 스위치 상태별 동작모드

Mode \ Switch	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
	$v_s > 0$		$v_s < 0$	
S_1/D_{s1}	OFF/OFF	OFF/ON	ON/OFF	OFF/OFF
S_2/D_{s2}	ON/OFF	OFF/OFF	OFF/OFF	OFF/ON
D_1	OFF	OFF	ON	ON
D_2	ON	ON	OFF	OFF

표 1은 단상 PWM 컨버터의 동작에 따른 모드별 반도체 소자의 상태를 보여준다. 컨버터 동작은 크게 4개의 동작모드로 나눌 수 있는데, 입력전압 v_s 가 양(+)의 반주기 동안에 Mode 1과 Mode 2를 반복적으로 수행하고, v_s 가 음(-)의 반주기 동안은 Mode 3과 Mode 4를 반복적으로 수행한다.

한편 제어시스템은 전체적인 시스템 성능과 신뢰도와 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 시스템의 신뢰도를 향상시키면서 경제성을 고려한 제어기 설계가 필요하다. 본 논문에서는 경제성을 고려하면서 시스템 성능을 보장하기 위해 부하단 직류전압과 입력전류 검출기만 이용하여 역률을 보장하면서 고조파를 저감시키는 제어 시스템을 제안한다. 부하단 직류전압 센서와 입력전류 센서는 과전압이나 과전류 보호를 위해 반드시 필요로 하나 입력전압 센서는 아무런 제약이 받지 않기 때문에 제거해도 무방하다. 입력전압 센서가 없는 대신 입력단 인덕터에 인가되는 전압이 무시될 정도면 입력전류와 부하단 직류전압을 이용하여 입력전압을 추정할 수 있다. 본 논문은 그림 2에서 보듯이 PI제어기를 통해 입력전압 추정 제어 방식을 사용하는 입력전압 센서가 필요없는 혼합형 PWM 컨버터를 보여준다.

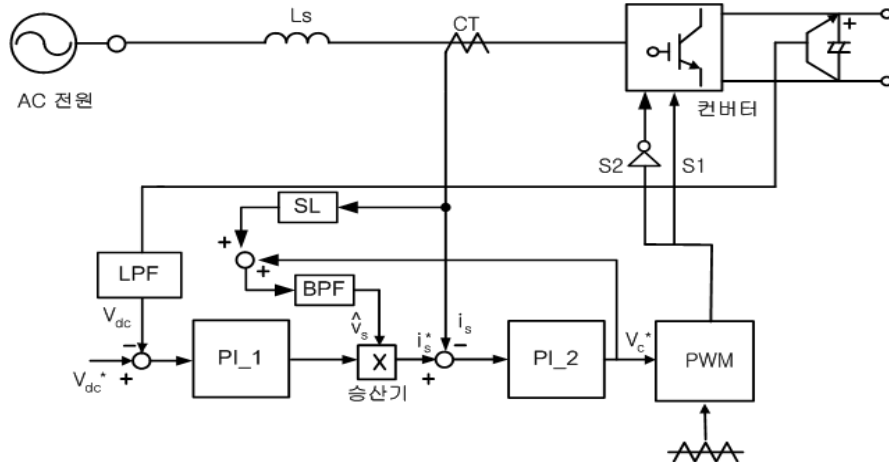


그림 2. 제안하는 혼합형 PWM 컨버터 제어구성도

제어기를 포함한 전체적인 시스템은 그림 2로 표현되며, KVL에 의해 식 (1)이 성립된다. 인덕터 L_s 값이 매우 작으면 식 (1) 우변의 첫 번째 항을 무시할 수 있기 때문에 컨버터 출력전압 V_c 의 입력전압 v_s 와 일치한다.

$$v_s(t) = L_s \frac{di_s(t)}{dt} + v_c(t) \cong v_c(t) \quad (1)$$

그러나 본 논문은 입력단 인덕터의 전압강하를 고려하여 제어기를 구현하였다. 입력전압에 대한 추정 전압 \hat{v}_s 는 컨버터의 추정전압 \hat{v}_c 에 인덕터의 전압 강하분이 더해지고 Band Pass Filter를 거쳐 얻어진다. 컨버터 추정전압 \hat{v}_c 는 측정된 입력전류 i_s 와 기준 입력전류 i_s^* 와 비교하고 PI 제어기를 거쳐 구해진다.

$$\hat{v}_c(s) = (i_s^* - i_s) \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) \quad (2)$$

기준 입력전류 i_s^* 는 측정된 전압 V_{dc} 와 기준전압 V_{dc}^* 와 비교하여 PI 제어기를 통해 얻어지고 이것의 위상은 추정 입력전압 \hat{v}_s 와 동기가 이루어진다.

$$i_s^* = (V_{dc}^* - V_{dc}) \left(K_{p2} - \frac{K_{i2}}{s} \right) \hat{v}_s \quad (3)$$

2.2 시뮬레이션

본 논문은 3개의 센서를 사용한 고속철도차량(KTX)의 보조전원장치에 적용하고 있는 혼합형 단상 PWM 컨버터를 적용한 경우와 제안한 2개의 센서를 사용했을 경우에 대해 고조파 함유량을 분석하였다. 시뮬레이션을 위해 혼합형 단상 PWM 컨버터에 대한 간이 축소형태의 모델을 삼았다. 그림 3은 3 개의 센서를 이용하는 일반적

인 혼합형 단상 PWM 컨버터로 KTX 철도차량에 적용되고 있으며, 입력전압 및 전류, 부하단 직류전압을 검출하여 역률개선 및 고조파 저감을 하면서 동시에 출력전압을 제어한다.

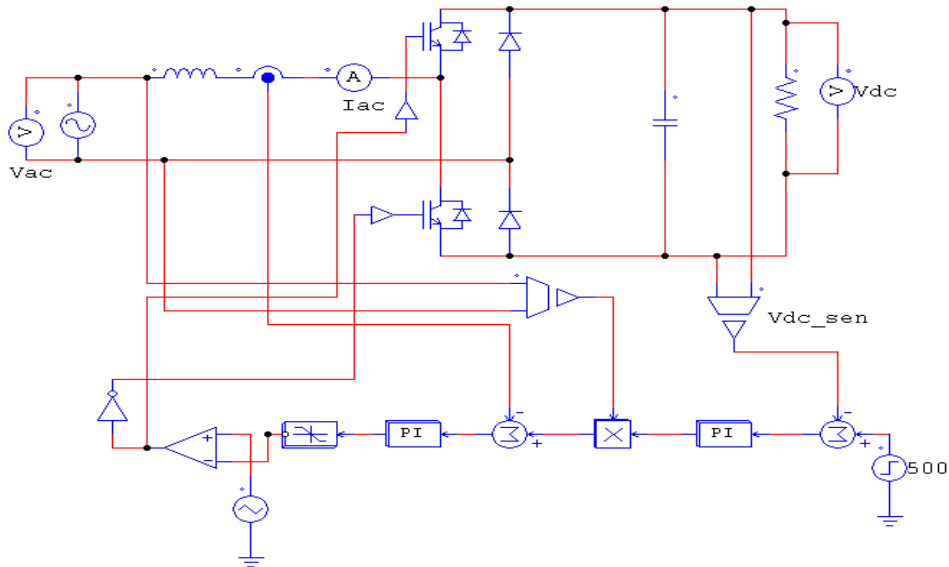


그림 3. KTX에 적용되고 있는 3개의 센서를 이용한 혼합형 PWM 컨버터

그림 4는 0.2초 시점에 부하단 직류전압을 500[V]로 제어하는 파형으로 0.2초 시점을 기준으로 파형을 분석해 보면, 입력전압은 실효값 220[V]가 인가되지만, 입력전류는 돌입전류가 주기적으로 흐른다. 또한 부하단 직류전압은 일반적인 다이오드 정류회로로 동작하기 때문에 300[V] 정도가 부하에 인가됨을 알 수 있다. 한편 0.2초 이후의 파형은 출력전압이 기준전압인 500[V]로 추종하고 있으며, 입력전류는 정현파에 가까운 파형으로 흐른다. 그림 5는 이에 대한 주파수 스펙트럼 분석(FFT)을 한 결과를 보여준다. 그림 5 (a)는 0.2초 이전의 입력 전압과 입력전류에 대한 FFT 분석으로 전압은 기본 주파수인 60[Hz]인 반면, 전류는 3차, 5차 등 저차 고조파 성분이 상당량 포함되어 있다. 그림 5 (b)는 0.2초 이후의 500[V]로 제어될 때 입력전압 및 전류에 대한 FFT 분석파형이다. 그림 5 (a)와 비교하면, 입력전압은 기본 주파수 성분을 유지하고 있으나, 입력전류는 저차 고조파 성분이 상당량 감소되어 있다.

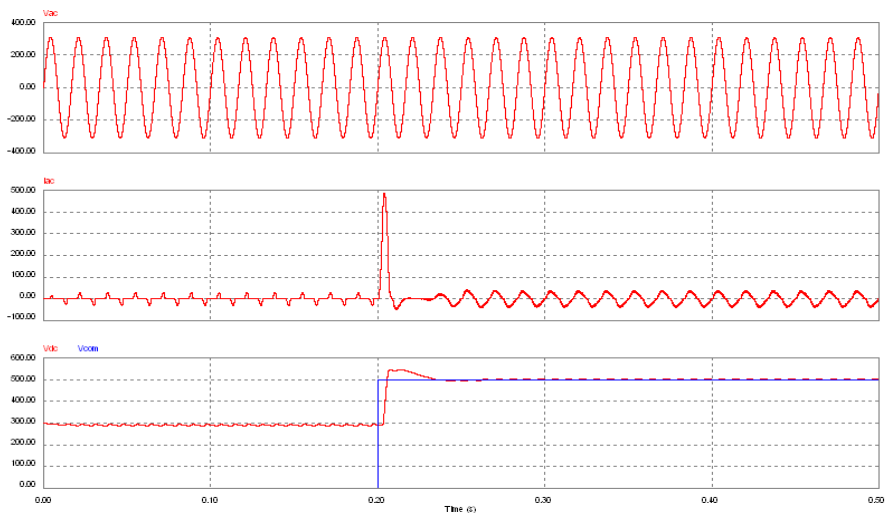
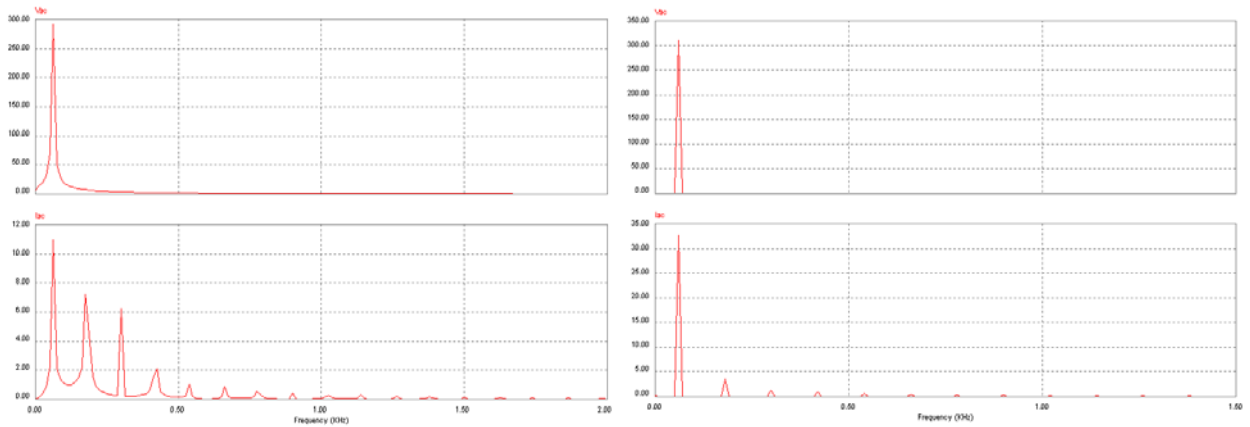


그림 4. 입력전압 및 전류, 기준전압에 대한 출력전압



(a) 0.2초 이전

(b) 0.2초 이후

그림 5. 0.2초 시점을 기준으로 입력전압 및 입력전류에 대한 FFT분석

그림 6은 본 논문에서 제안하는 혼합형 PWM 컨버터 시스템에 대한 시뮬레이션 회로도도를 보여준다. 보는 바와 같이 입력전압 검출이 필요 없고 입력전류와 부하단 직류전압만을 이용하여 입력전압을 추정하면서 입력전류의 역률개선 및 고조파 저감과 동시에 출력전압을 제어하고 있다. 그림 7 (a)는 0.05초 되는 시점에 출력전압을 500[V]로 했을 때 파형을 보여준다. 일반적인 혼합형 PWM 컨버터처럼 돌입전류가 흐르다가 500[V]에 대한 기준전압을 주었을 때 부하단 직류전압이 기준전압을 추정하고 있으며 추정되는 입력전압을 바탕으로 입력전류가 정현파에 가까운 파형으로 흐른다.

주파수 분석(FFT)을 통해 고조파 함유량에 대해 고찰해 보면 그림 7 (b)와 같다. 실제 입력전압은 기본파인 60[Hz]가 인가되고 있으며, 입력전류와 출력전압으로부터 추정되는 입력전압인 경우 고조파 성분이 없는 기본파에 가까운 전압을 추정하고 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 제어되는 입력측 전류 파형을 보면 저차 고조파 성분이 상당량 감소된 형태로 그림 5 (b)와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다.

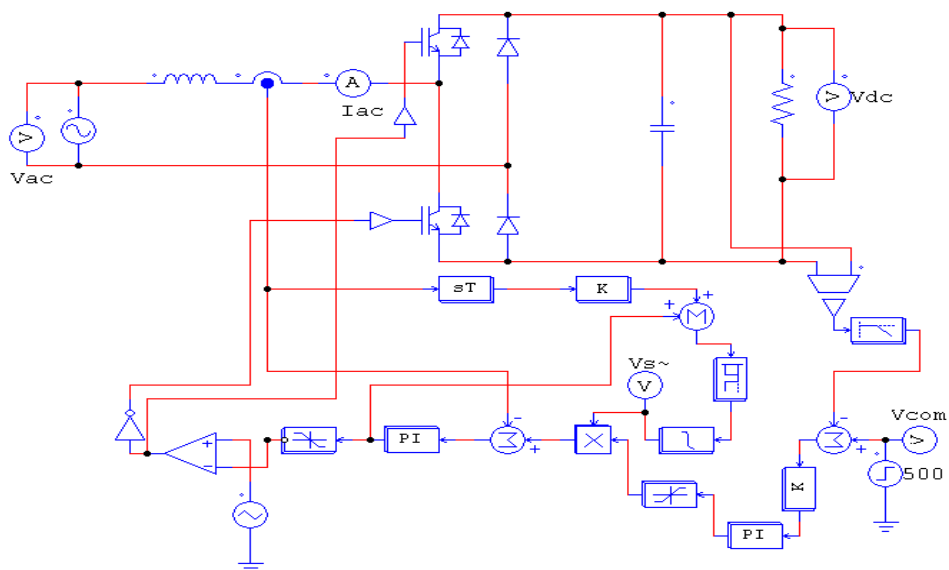
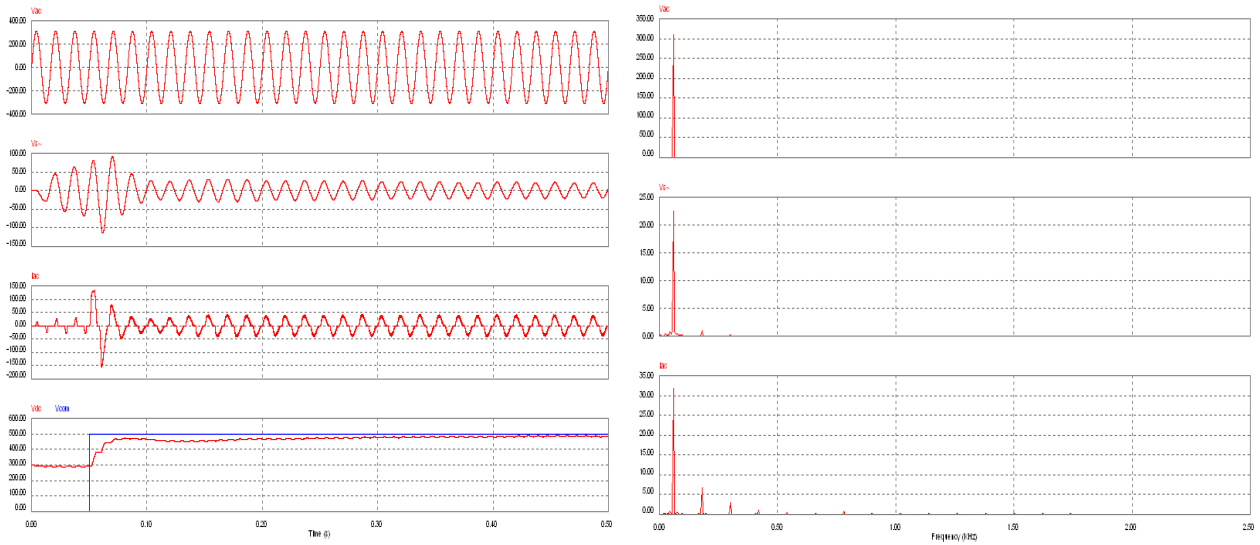


그림 6. 제안하는 시스템에 대한 시뮬레이션 구성도



(a) 입력전압, 추정전압, 입력전류, 출력전압

(b) 입력전압, 추정된 입력전압, 입력전류

그림 7. 입력전압, 추정된 입력전압, 입력전류에 대한 파형 및 FFT 분석

3. 결 론

본 논문에서는 국내에서 운행 중에 있는 고속철도차량(KTX)의 보조전원장치의 혼합형 PWM 컨버터에 대해 연구하였다. KTX 차량인 경우 3개의 센서를 사용하여 컨버터를 제어하지만, 경제성 및 신뢰성을 고려하여 제어시스템에 대한 알고리즘을 개발하여 현재 운용되고 있는 시스템에 적용하여 보았다. 입력에 나타나는 전류성분의 고조파 요인을 분석하고 현재 국내외 차량에 적용되고 있는 혼합형 PWM 컨버터에 대해 모드별 분석을 하고 시뮬레이션을 수행하였다. 뿐만 아니라 기존의 혼합형 PWM 컨버터에 대한 고조파 함유량 정도를 비교 분석하였으며 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 혼합형 단상 PWM컨버터인 경우 스위칭 소자로 제어하지 않을 경우 일반적인 단상 다이오드 정류회로 구조로 컨버터 입력에 돌입전류가 흐르게 되어 상당량의 고조파 전류가 함유된다.
2. 3개의 센서를 사용한 경우와 2개의 센서만을 이용한 경우 이론적 고찰을 통해 컨버터 입력전류를 정현파에 가깝게 구현할 수 있어 고조파 함유량을 줄일 수 있다.

참고문헌

1. Wen-Inne Tsai, York-Yih Sun, and Wue-Shyong Shieh, "Modelling and Control of Single Phase Switching Mode Rectifiers with Near-Optimum Dynamic Regulation, pp.501-506, Proceeding of IECON'91
2. G.H. Rim, W.H. Kim, and I. Kang(1995), "A Simplified analog controller for power factor correction converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 4, pp. 417-418
3. Jee-Woo Lim and Bong-Hwan Kwon(1999), "A Power-Factor Controller for Single-Phase PWM rectifiers", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, pp. 1035-1037