1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

3상 전압형 PWM 컨버터의 전압 센서리스 제어

허태원* · 조광승* · 김영빈* · 서정기** · 조용길* · 우정인*
동아대학교*, 한국전기안전공사**

Voltage Sensorless Control for Three-Phase Voltage Source PWM Converter

Tae-Won Heo* · Kwang-Seung Cho* · Young-Bin Kim* · Jung-Ki Seo** · Yong-Gil Cho · Jung-In Woo*
Dong-A Univ.*, Daeheung Co. Ltd.**

Abstract - This paper presents a control scheme for a three-phase PWM converter system without any voltage sensors. Two input currents and one load current are measured. In a general PWM converter system, the required AC input and DC output voltage values in order to control the converter are estimated using the differential equations of the converter from the measured input currents and load current values in the switch modes of the converter circuit. The PI controller is used as DC voltage controller and sinusoidal tracking controller which tracks directly AC input current is used as input current controller.

The proposed method is verified by simulations. This paper describes the estimation method and configuration of the controller, and discusses steady state and transient performances of the converter

1. 서 론

기존의 교류-직류 전력변환기로는 다이오드 정류기 또는 사이리스터 위상제어 정류기가 대부분 이었다. 그러나 이러한 정류용 변환기들은 역률이 떨어지고 입력 선전류에 고조파가 많이 포함되고 전력계통에 악영향을 끼치고 있으며, 안정된 전원전력을 요구하는 정밀기기에서 오동작 및 파손을 야기 시킬 수 있다. 이에 대한 해결책으로서 전력용 스위칭소자로 구성된 정류와 회생능력을 함께 가지는 PWM 컨버터가 사용되고 있으며, 고조파 제거 및 역률개선을 위하여 여러 제어기법들이 적용되고 있다[1].

일반적으로 전압형 PWM 컨버터의 제어는 외부 전압제어 루프와 내부 전류제어 루프로 구성되며, 전압제어를 위한 직류 출력전압 검출, 전류제어를 위한 입력전류 검출이 필요하게 되고, 전류지령치의 생성을 위한 입력전압의 검출 또한 필요하게 된다. 최근에는 컨버터 시스템의 간소화 측면에서 센서의 수를 줄이기 위한 방법이 연구되고 있고, 또한 전류센서의 출력과 연산에 의하여 전압센서를 제거하는 연구가 발표되었다[2]. 그리고, 전류센서를 제거한 방법도 발표되었다[3]. 이러한 센서리스기법은 시스템의 간소화, 전력회로와 제어기 간의 절연 그리고 가격면에서 기술적, 경제적 기여도가 높다.

본 논문에서는 3상 PWM 컨버터에서 두 상의 입력전류와 부하전류의 검출 만으로 입력전압 및 출력전압을 추정하는 전압 센서리스 제어기법을 제안하고, 컨버터의 모델링으로부터, 검출된 전류값으로 입력전압과 출력전압이 추정된다. 또한, 출력전압 제어기는 PI 제어기를 사용하고, 교류 입력전류를 직접 추종하는 정현추종 제어기를 입력전류 제어기로 사용하여 컨버터 제어시스템을 구성한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 제안하는 방식의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 전압 추정

2.1 컨버터 모델링

그림 1은 전력용 스위칭소자와 다이오드로 구성된 일반적인 전압형 PWM 컨버터의 회로도이다.

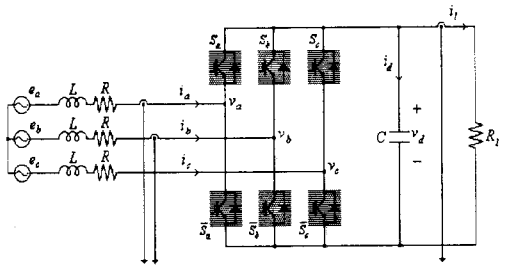


그림 1. 전압형 PWM 컨버터 회로

여기서, e_a, e_b, e_c는 입력상전압, i_a, i_b, i_c는 입력전류, v_a, v_b, v_c는 브리지 입력상전압, v_d는 직류 출력전압이고, L과 R은 교류측 인덕턴스와 저항분, C와 R_d는 직류측 커패시터와 부하저항을 나타낸다. 그림 1에서 각 상에 대한 전압방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= R i_a + L\frac{di_a}{dt} + v_a \\ e_b &= R i_b + L\frac{di_b}{dt} + v_b \\ e_a &= R i_c + L\frac{di_c}{dt} + v_c \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 우변 제 3항의 브리지 입력상전압은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_a &= \left\{\frac{2}{3}S_a - \frac{1}{3}(S_b + S_c)\right\} v_d \\ v_b &= \left\{\frac{2}{3}S_b - \frac{1}{3}(S_c + S_a)\right\} v_d \\ v_c &= \left\{\frac{2}{3}S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b)\right\} v_d \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, S_a, S_b, S_c는 각 상의 스위칭상태를 나타내며, ON 상태일 때는 1이고 OFF 상태일 때는 0이다. 상·하 스위치는 동시에 ON 될 수 없으며, $S_a + \overline{S_a} = 1$이다. 그리고, 나머지 두 상에 대해서도 동일하다.

또한, 그림 1로부터 전류방정식을 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$C\frac{dv_d}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - i_l \tag{3}$$

2.2 출력전압 추정

스위칭상태가 $S_a=1$, $\overline{S_b}=1$, $\overline{S_c}=1$일 경우에 대해서 고려해 보면, 직류 출력전압 v_d는 식 (4)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{v_d} = \frac{1}{C}\int (i_a - i_l)\,dt \tag{4}$$

2.3 입력전압 추정

교류 입력전원이 평형 3상이라고 가정하면 입력전류는 식 (5)와 같은 조건을 만족하므로 검출된 두 상의 전류로부터 나머지 한 상의 전류를 구해 낼 수 있다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{5}$$

추정된 직류 출력전압과 식 (1), (2)를 이용하면 다음과 같이 입력전압을 추정 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\hat{e_a} &= R i_a + L\frac{di_a}{dt} + \frac{2}{3C}\int (i_a - i_l)\,dt \\
\hat{e_b} &= R i_b + L\frac{di_b}{dt} - \frac{1}{3C}\int (i_b - i_l)\,dt \\
\hat{e_c} &= R i_c + L\frac{di_c}{dt} - \frac{1}{3C}\int (i_c - i_l)\,dt
\end{aligned} \tag{6}$$

3. 제어 방법

그림 2는 컨버터의 제어시스템을 나타낸다. 검출된 전류값들로부터 직류전압 $\hat{v_d}$를 추정하고, 전압제어기에 의하여 입력전류 진폭지령치 I_m^*를 생성한다. 이 값은 추정된 단위진폭의 입력전압과 곱해져서 입력전류 지령치 i_{abc}^*를 만들어 낸다.

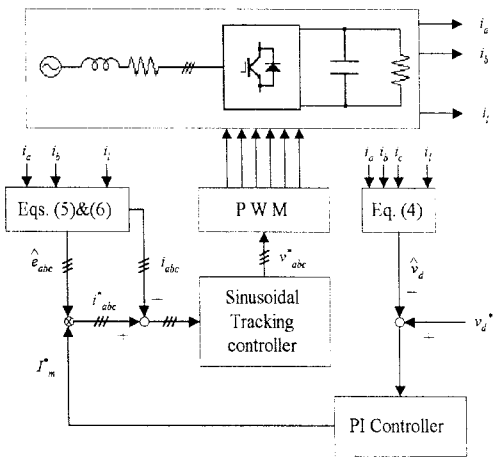


그림 2. 제안된 PWM 컨버터의 제어시스템

3.1 전압 제어

입력전류의 진폭지령치 I_m^*는 전압제어기로부터 얻어내며, 여기서는 PI 제어기를 사용하여 추정된 직류출력전압 $\hat{v_d}$를 지령치 v_d^*에 추종하도록 한다.

3.2 전류 제어

그림 1로부터 교류 입력측회로의 전달함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{I(s)}{E(s) - V(s)} = \frac{1}{Ls + R} \tag{7}$$

여기서 각 요소들은 라플라스 변환값들로 표현되었으며, L과 R은 교류측 인덕턴스와 저항분을 나타낸다.

교류성분인 입력전류를 정상편차 없이 직접 추종제어하기 위하여 전원전류 지령치의 극과 동일한 극이 제어계 내부에 존재하도록 한다. 교류 입력전류의 지령신호와 동일한 극을 갖는 정현추종 제어기는 다음식으로 표현된다.

$$G_S(s) = \frac{K_S \cdot \omega^2}{s^2 + \omega^2} \tag{8}$$

여기서, K_S는 정현추종 제어기의 이득이며, ω는 입력각주파수와 같다.

식 (7)과 (8)로부터 입력전류 제어계는 그림 3과 같이 구성한다. 제어기는 브리지 입력상전압과 같은 신호를 출력하게 되며, 캐리어신호와 비교되어 컨버터의 스위칭 패턴을 생성한다. 여기서, K_P는 비례이득을 나타낸다.

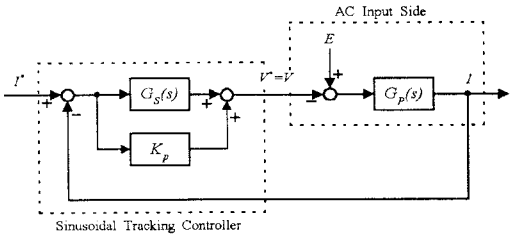


그림 3. 입력전류 제어계의 블럭선도

제어기의 제어성능을 확인하기 위하여 그림 3으로부터 입력전류 지령치 I^*에 대한 입력전류 I의 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{-G_S(s)\,G_P(s)}{1 - \{K_P + G_S(s)\}\,G_P(s)} \tag{9}$$

식 (3), (4)를 식 (5)에 대입하고, 입력주파수에 대한 특성을 확인하기 위하여 $s=j\omega$를 대입하여 풀면, 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{I(j\omega)}{I^*(j\omega)} = 1 \tag{10}$$

I^*에 대한 I의 전달함수가 1이라는 것은 각각의 파라메타 값들에 영향을 받지않고 정상상태 오차가 0이됨을 의미한다. 즉, 정현신호인 입력전류가 지령치신호를 완벽하게 추종함을 의미한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 제어방법의 타당성을 검토하기 위하여 다음과 같이 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션은 PSIM을 사용하였으며, 사용된 시스템 파라미터는 1표 1에 주어진다.

표 1. 시스템 파라미터

입력 선간전압	$e=100[V]$ / $60[Hz]$
교류측 인덕턴스	$L=6.5[mH]$
교류측 저항분	$R=0.5[\Omega]$
직류측 커패시턴스	$C=500[\mu F]$
직류 출력전압 지령치	$v_d^*=200[V]$
스위칭 주파수	$f_s=1.8[kHz]$

제안된 PWM 컨버터 시스템은 PSIM의 SIMCAD상에서 그림 4와 같이 구현 할 수 있다.

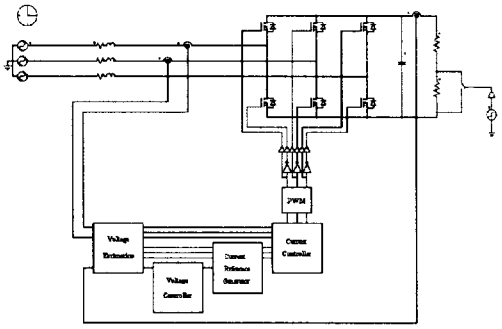
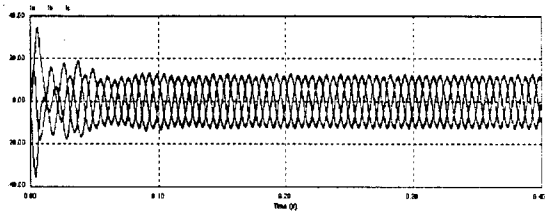
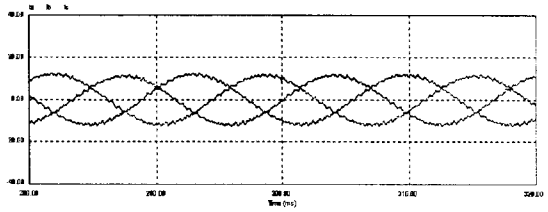


그림 4 SIMCAD로 구현한 PWM 컨버터 시스템

그림 5는 각 상의 입력전류 파형으로 거의 정현파에 가깝게 제어되고 있음을 확인 할 수 있다. (b)는 $0.28[ms]\sim0.32[ms]$ 에서의 확대파형이다.

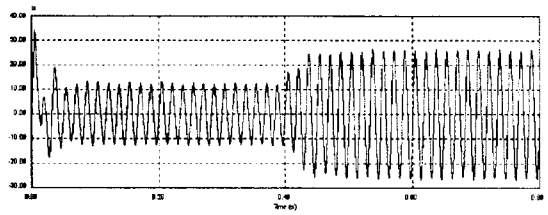


(a) 입력전류

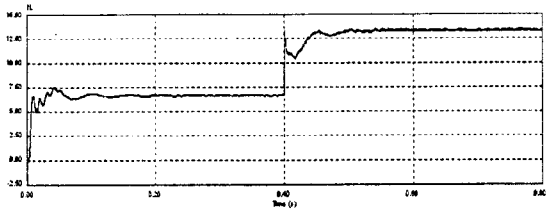


(b) 입력전류 확대파형

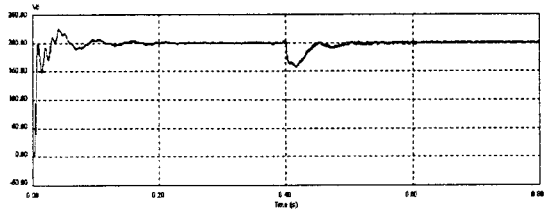
그림 5 각 상에 대한 입력전류



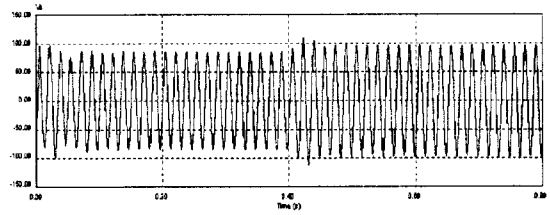
(a) 입력전류



(b) 부하전류



(c) 출력전압



(d) 브리지 입력상전압

그림 6 부하변동에 대한 각부 파형

그림 6에서는 저항부하를 $0.4[ms]$ 시점에서 급변시켰을 경우의 각부 파형을 나타내고 있다. 각 파형 모두 정상상태 및 과도상태에서도 양호한 제어특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그리고, (c)의 직류 출력전압은 지령치 $200[V]$ 로 정확히 제어되고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 두 상의 입력전류와 부하전류만을 검출하여 입력전압 및 출력전압을 추정하는 3상 PWM 컨버터 시스템을 제안하였다. 출력전압 제어기로 PI 제어기를 사용하고, 교류 입력전류를 직접 추종하는 정현추종 제어기를 전류제어기로 사용하여 출력전압 및 입력전류의 양호한 제어특성을 확인 할 수 있었다. 그리고 입력전류파형이 거의 정현파로 개선됨을 확인하였다.

제안한 전압 센서리스 제어기법을 바탕으로 컨버터 시스템에 향후 적용할 예정이며, 시스템의 간소화 및 경제적 측면에서 활용도가 높을 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

[1]Rusong Wu, Shashi B. Dewan, and Gordon R. Slemon, "Analysis of a PWM ac to dc Voltage Source Converter under the Predicted Current Control with a Fixed Switching Frequency", IEEE Trans. IA, Vol. 27, No. 4, pp. 756-764, 1991.

[2] Toshiya Ohnuki, Osamu Miyashita, Philippe Lataire, and Gaston Maggetto, "Control of a Three-Phase PWM Rectifier Using Estimated AC-Side and DC-Side Voltages" IEEE Trans. PE, Vol. 14, No. 2, pp. 222-226, 1999

[3] Shibashis Bhowmik, Annabelle van Zyl, Rene Spee, and Johan H. R. Enslin, "Sensorless Current Control for Active Rectifiers", IEEE Trans. IA, Vol. 33, No. 3, pp. 765-773, 1997