

# 예측 상태 관측기를 이용한 3상 전압 원 PWM 컨버터의 단일 센서 전류 제어

이 우 철\* · 현 동 석\* · 이 택 기\*\*\*

\*한양대학교 전기공학과, \*\*한경대학교 전기공학과

## Single Sensor Current Control for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters Using a Predictive State Observer

Woo-Cheol Lee · Dong-Seok Hyun · Taek-Kie Lee

Hanyang Univ., Hankyung Univ.

### Abstract

This paper proposes a control method for three-phase voltage-source PWM converters using only a single current sensor in the DC link. A predictive current controller for the voltage-source PWM converter is used so that all phase currents can be reconstructed in a switching period although one or two of active vectors are applied only for a short time. Compensation of the 2 step delays is also included. In this paper single sensor current control using predictive state observer will be discussed, and investigated experimentally.

### 1. 서 론

3상 전압형 PWM 컨버터는 첫째로, 입력 전류를 정현적으로 제어 할 수 있어 입력 전류의 저 차 고조파 성분을 감소시킬 수 있고 둘째로, 입력 전압과 동상으로 입력 전류를 제어 할 수 있으며 셋째로, DC 전압을 승압시킬 수 있고 부하 변동에 대해 일정하게 유지 할 수 있으며 넷째로, 부하 측의 잉여 전력을 DC 전압의 변동 없이 교류 전원 측으로 회생시킬 수 있다. 이러한 장점들로 인해 3상 전압 원 PWM 컨버터는 사용이 증가하고 있으며, 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 PWM 컨버터를 구현하기 위해서는 여러가지의 부가 장치가 필요하다. 특히 전류 센서는 입력 상 전류를 정확히 검출하고 제어하기 위하여 필요하다. 대개의 경우 전류 제어를 위해 최소한인 2개의 전류센서가 사용된다. 또한 DC측 단락과 부하 전류 검출을 위해서는 별도의 전류 센서가 필요하다. 그래서 고가의 전류 센서의 수를 줄이고자 하는 연구가 특히 전동기 구동 응용

분야에서 활발히 진행되고 있다[1]. 여러 가지 인버터 스위치 상태에서 DC link 전류와 상 전류 사이에서의 관계는 이미 보고되었다[2]. 그러나 어떤 조건하에서, 즉 PWM 주기 내에 유효 벡터가 아주 짧은 시간동안 존재 할 때는 DC link 전류로부터 두상 전류를 알아 낼 수 없는 문제가 발생한다. 그러므로 유효 벡터에 대한 최소한의 시간이 확보가 돼야만 주어진 변조 싸이클에서 정확한 DC 전류를 검출 할 수 있다. 본 논문에서는 유효 전압 벡터가 최소인가 시간 보다 작아 제어 성능을 떨어뜨리는 경우 예측 상태 관측기를 이용하여 그 문제를 해결하였다. 또한 DC link 전류를 검출해 입력 전류를 재구축 시 2 스텝 지연이 필연적으로 발생되는데 이에 대한 해결 방안을 제시한다. 그리고 실험 결과를 통해 그 유용성을 입증한다.

### 2. 3상 전압 원 PWM 컨버터의 수학적 모델링

#### 2.1 수학적 모델링

3상 전압 원 PWM 컨버터의 회로 구성은 그림 1과 같고, 3상 입력 전원 전압은 대칭, 입력 전류의 합이 영인 경우 다음과 같은 전압 방정식을 얻을 수 있다.

$$LpI_{abc} + RI_{abc} + V_{abc} = E_{abc} \quad (1)$$

$$i_{dc} = S_{abc}^T I_{abc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2)$$

여기서  $X_{abc}^T = [X_a, X_b, X_c]$  ( $X \in I, V, E, S$ )

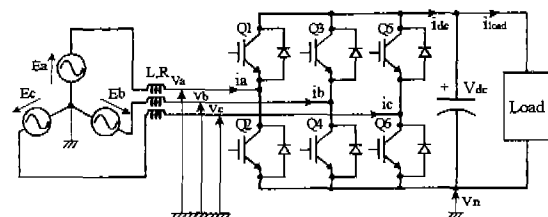


그림 1 3상 PWM 정류기

3상의 입력 전압, 입력 전류, 컨버터 변조 전압은 식 (3)를 이용하여 정지 좌표 계에서의 공간 벡터 량으로 변환 할 수 있다.

$$X_{dq}^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & +\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} X_{abc} \quad (3)$$

$$p I_{dq}^s = A I_{dq}^s + B (E_{dq}^s - V_{dq}^s) \quad (4)$$

여기서  $[X_{dq}^s]^T = [X_d^s, X_q^s]$ ,  $A = -\frac{R}{L} I_2$ ,  $B = \frac{1}{L} I_2$ 이다 식 (1)~(4)는 미분 방정식 식(5)로 표시 할 수 있다.

$$I_{dq}^s(n+1) = \Phi I_{dq}^s(n) + \Gamma (E_{dq}^s(n) - V_{dq}^s(n)) \quad (5)$$

여기서  $\Phi = e^{AT}$ ,  $\Gamma = \int_0^T e^{AS} dS B$ 이다.

### 2.2 예측 상태 관측기

상태 관측기는 다음 샘플링 순간 실제 전류 벡터를 구할 수 있다. 단순한 open loop 관측기는 식 (5)로 구할 수 있다[3]. 그러나 초기 추정치 또는 PWM 정류기의 파라미터 값의 오차로 인한 영향으로 부적절한 추정치가 얻어 질 수가 있어 식 (6)처럼 closed loop 관측기를 구성 될수 있다.

$$\hat{I}_{dq}^s(n+1) = \Phi \hat{I}_{dq}^s(n) + \Gamma [E_{dq}^s(n) - V_{dq}^s(n)] + K_0 [I_{dq}^s(n) - \hat{I}_{dq}^s(n)] \quad (6)$$

여기서  $I_{dq}^s(n)$  측정된 전류 벡터이다. 만약 입력 전류를 직접 측정 할 경우 이 값은 식 (4)로 구할 수 있다. 그러나 단일 전류 센서를 사용할 경우  $I_{dq}^s(n)$ 의 직접적인 계산은 할 수가 없어, 이 값은 DC link 전류를 스위칭 상태에 따라 재구축 된 전류 값이 사용된다.

### 3. 샘플링 지연에 대한 보상

단일 전류 센서를 사용하여 입력 상 전류의 재구축 시 2샘플링 지연이 필연적으로 발생된다. 즉  $T_{n-1}$  시점에서의 전압, 전류 값이  $T_{n+1}$  시점에서 PWM 컨버터의 전압, 전류 기준 값을 결정하는데 사용되기 때문에 발생된다. 그러나 샘플링 되는 전압, 전류 값을 그림 2에서

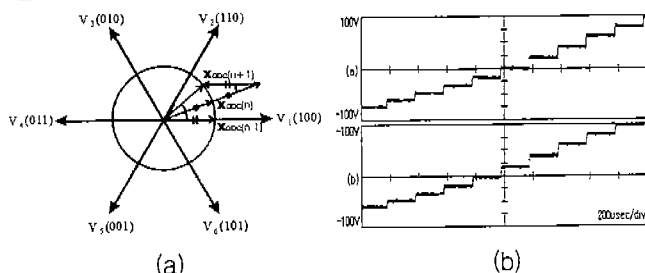


그림 2 샘플링 지연에 대한 보상  
(a) 벡터 선도 (b) (a):보상 전 (b):보상 후

설명되듯이 식 (7)를 이용하여 보상할 수 있다.

$$X_{abc}(n+1) = 2 \times X_{abc}(n) - X_{abc}(n-1) \quad (7)$$

그림 2(b)는 입력전압을 Feedback 받을 때 샘플링 지연이 보상 전과 보상 후의 입력 전압 파형이다.

### 4. 전류 재구축을 위한 기본 원리

전류 방향을 결정하는 전압 벡터 패턴은 그림 3에 나타나 있다. 이 그림에서 유효 벡터 각각에 해당되는 전류 흐름은 굵은 선으로 표시가 된다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 전압 벡터  $V_7(000)$ 과  $V_1(100)$ 가 가해질 때, 해당되는 전류의 흐름은 그림 3(b)와 그림 3(c)에 보여진다. DC link 전류 센서로부터 상 전류의 재구축은 두 개의 유효벡터가 적어도 샘플링 되기에 충분한 시간동안 존재 할 때만이 가능하다. 즉, DC 전류 센서로부터 측정된 값을 사용하여, 하나의 유효 전압 벡터는 한 상 전류를 재 구축하기 위하여 사용되고, 또 다른 전압 벡터는 다른 상 전류를 구축하기 위하여 사용된다. 즉, 비록 단일 DC link 전류 센서가 사용되더라도 서로 다른 유효 벡터로 구성되는 각각의 스위치 상태는 상 전류에 대한 정보를 제공해 준다. 또한 영 벡터  $V_8(111)$  동안 DC link로부터 상 전류에 대한 정보는 DC link 단 단락 검출을 위하여 사용될 수 있다. 인가된 유효 벡터와 DC link 센서로부터 측정된 상 전류 사이의 관계는 표 1에 나타나 있다.

### 5. 단일 전류 검출의 문제점

단일 전류 센서를 이용해 3상 입력 전류를 재구축하기 위해서는 유효 벡터가 식 (8)처럼 최소한의 폭을 가지고 있어야 한다.

$$T_{\min} = t_d + t_{sett} + t_{conv} \quad (8)$$

$t_d$  는데드타임, 일정 확립 시간,  $t_{sett}$ 는 DC link 전류가 샘플링 되기 전 확실히 확립되기 위하여 유지 되어야 한다.  $t_{conv}$  는 A/D 변환 시간을 나타낸다.

표 1 유효 전압 벡터에 따른 DC link 전류

Voltage Vector	DC link current $i_{DC}$
$V_1 = (100)$	$+i_a$
$V_2 = (110)$	$-i_c$
$V_3 = (010)$	$+i_b$
$V_4 = (011)$	$-i_a$
$V_5 = (001)$	$+i_c$
$V_6 = (101)$	$-i_b$
$V_7 = (000), V_8 = (111)$	0

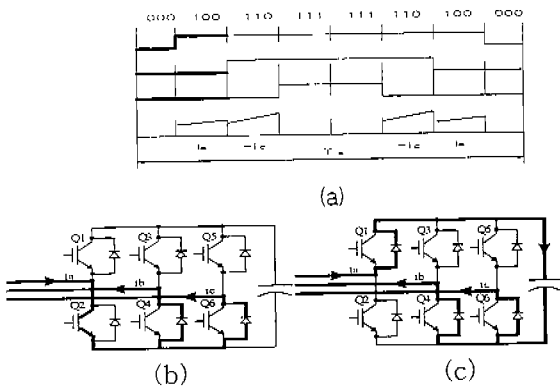


그림 3 영역 I에서 PWM 신호와 DC link 전류 그러나 기준 전압 벡터가 6개의 유효 벡터 영역을 지나 갈 때와 부족 변조인 경우(low modulation index) 최소한의 시간을 확보하기가 어렵게 된다. 전자의 경우 그림 4(a)에서 빗금 친 영역에 해당되는데 이 영역은 스위칭 영역이 I에서 VI까지 차례로 변환에 따라 기본 주기마다 6번 발생된다. 즉 영역이 변할 때마다 기준 전압 벡터는 6개의 가능한 벡터 중 한 곳을 지나게 되고 그 영역 주위에서 2개의 유효 벡터 중 하나가 최소시간보다 작은 시간이 인가된다. 따라서 한 상의 전류만이 정확히 재구축 될 수 있다. 이 예는 그림 4(c)에 설명이 되는데, 즉 기준 전압 벡터가 영역 I,  $V_1(100)$  벡터 근처에 있는 경우로 이 전압 벡터는  $V_1(100)$ ,  $V_2(110)$ , 영 벡터로 나누어 질 수 있다.  $V_1(100)$  벡터는 인가 시간이 충분해  $+i_a$  전류를 재구축 할 수 있으나  $V_2(110)$  벡터는 인가 시간이 불충분해  $-i_c$  를 재구축 할 수 없다. 후자인 경우 부족 변조인 경우를 설명하는 경우로 그림 4(b)에 의해 설명이 된다. 이 예는 그림 4(d)에 설명이 되는데 즉, 기준 전압 벡터가 영역 I에 있을 경우로 이 전압 벡터는  $V_1(100)$ ,  $V_2(110)$ , 영 벡터로 나누어 질 수 있다. 그러나  $V_1(100)$  벡터,  $V_2(110)$  벡터의 인가 시간이 부족해 입력 상전류를 재구축할 수 없다. 최근 상 전류를 정확히 재구축 하기 위한 방법이 제시되었는데. 이는 스위칭 시 기준 전압 오차 없이 한 샘플링 주기 동안에 시 비율을 조정하는 것이다[4]. 기준 전압 벡터가 영역 I에 있을 경우로 전압 벡터  $V_2(110)$  를 최소시간만큼 인가하고, 다시 전압 벡터  $V_6(101)$  를 최소시간만큼 인가하여 스위칭 시 기준 전압의 오차 없이 한 샘플링 주기 동안에 시 비율을 조정하는 방법이다. 그러나 이 방법은 부족 변조 시 적절한 제어가 없으면 부 적절한 상 전류가 얻어 질 수밖에 없다.

## 6. 예측 상태 관측기로부터의 $I_{dq}^s$ 의 계산

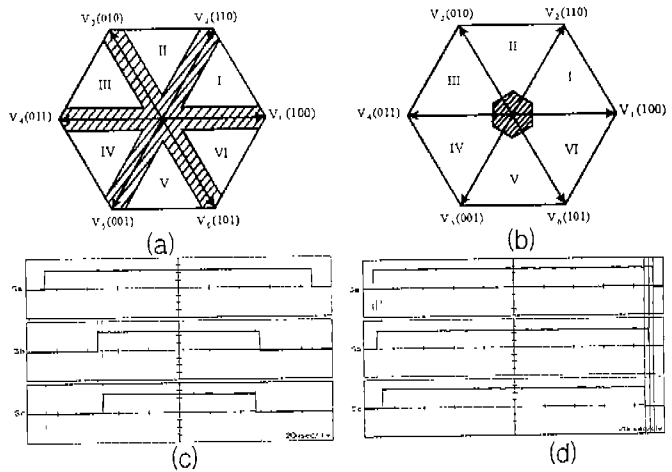


그림 4 입력 상 전류를 재구축 할 수 없는 영역  
(a) 전압벡터가 6개의 가능한 벡터중 한 곳을 지날 때  
(b) 부족 변조 영역인 경우  
(c) (a)인 경우 3상 PWM 신호의 예  
(d) (b)인 경우 3상 PWM 신호의 예

6-1 기준 전압 벡터가 6개의 가능한 벡터 중 한 곳을 지날 때

이 경우 1상의 전류만 재구축 되므로  $I_{dq}^s$  를 구하기 위하여 다른 상 전류는 재구축 된 전류와 이를 이용한 부분적으로 갱신된 측정 벡터(partially updated measurement vector)를 사용하여 구한다[5].

6-1-1 a상 전류만 재구축 시 ( $\delta = i_a - \hat{i}_a$ )

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(\hat{i}_b - \hat{i}_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^s \\ \hat{i}_q^s \end{bmatrix}$$

6-1-2 b 상 전류만 재구축 시 ( $\delta = i_b - \hat{i}_b$ )

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_a - \frac{1}{2}\delta \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - \hat{i}_c + \frac{1}{2}\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{4}\hat{i}_d^s + \frac{\sqrt{3}}{4}i_a^s - \frac{1}{2}i_b \\ \frac{\sqrt{3}}{4}\hat{i}_d^s + \frac{1}{4}i_a^s + \frac{\sqrt{3}}{2}i_b \end{bmatrix}$$

6-1-2 c 상 전류만 재구축 시 ( $\delta = i_c - \hat{i}_c$ ):

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_a - \frac{1}{2}\delta \\ \frac{1}{\sqrt{3}}(\hat{i}_b - \frac{1}{2}\delta - i_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{4}\hat{i}_d^s - \frac{\sqrt{3}}{4}i_a^s - \frac{1}{2}i_c \\ -\frac{\sqrt{3}}{4}\hat{i}_d^s + \frac{1}{4}i_a^s - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c \end{bmatrix}$$

6-2 부족 변조인 경우

2개의 유효 벡터가 최소 시간 보다 짧게 인가 되 입력 상 전류를 재구축 할 수 없을 경우 관측기 출력이 그대로 사용된다. 이 경우 관측기는 open loop로 동작을 하지만 계속해서 feedback 치가 인가된다.

## 7. 실험 결과

표 2는 시스템 파라미터 이다. 모든 알고리즘을 구현하기 위해 DSP TMS320C31가 사용되었다. PWM 스위칭 주기는  $200\mu s$ 이다. 12bit A/D 컨버터의 변환 시간은  $3.5\mu s$  이고, Dead time으로는  $5\mu s$  를 주었다. 내부 타이머 인터럽트는 DC link 전류의 샘플링 순간을 결정하기 위하여 사용된다. 적절한 샘플링을 확보하기 위하여 최소인가 시간  $t_{min}$  으로는  $10\mu s$  가 사용되었다. 그림 5(a) 은 DC link 전류는 각기 다른 PWM 신호에 따라 전류 값이 변화함을 보여준다

그림 5(b),6(a)는 샘플링 지연을 보상 전, 후의 입력 전압, 전류 파형을 보여준다. 그리고 입력 전류 파형은 샘플링 지연을 보상을 했을 때가 보다 정현파에 가까워지는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 제안된 방법에 의한 정상 상태 시 입력 전압, 전류 파형이다. 그림 5(b)에 비해 약간 왜곡됨을 보이나 정현파와 유사한 전류 파형을 보여 준다. 이때 관측기 이득  $K_0$  는 0.4로 설정하였다.

그림 7은 스텝부하 인가 시 파형을 보여준다. 그림 7(a)는 입력 전류 센서를 사용하였으나 DC 부하 전류 검출용 전류센서를 사용하지 안 했을 경우로, 부하 전류를 전향 보상하지 못하여 DC link 전압이 약 350V까지 떨어 짐을 알 수 있다. 그림 7(b)는 입력 전류 센서를 사용하지 않고 DC link단에 단일 전류 센서를 사용했을 경우로, 이 검출 전류를 부하

표 2 시스템 파라미터

Input Voltage	3 phase 220V
Output DC Voltage	DC 370V
Output rating	10kVA
Input reactor	1.3mH
DC link capacitor	13,000uF

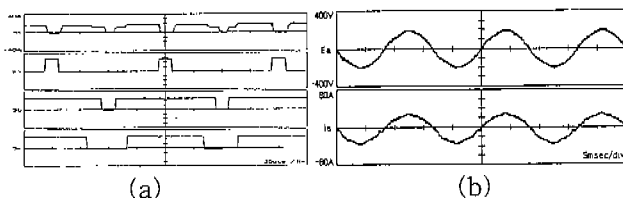


그림 5 PWM 신호와 입력 전압,전류  
(a) DC 전류와 PWM 신호  
(b) 지연 보상 후 전압, 전류 파형

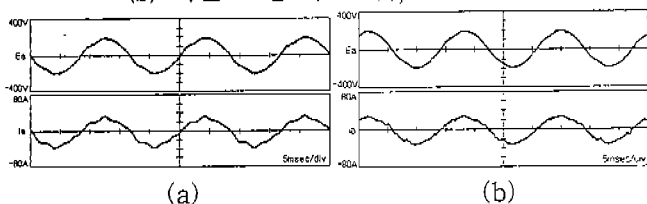


그림 6 입력 전압, 전류 파형  
(a) 지연 보상 후 전압, 전류 파형  
(b) 제안된 방법에 의한 정상상태 전압,전류

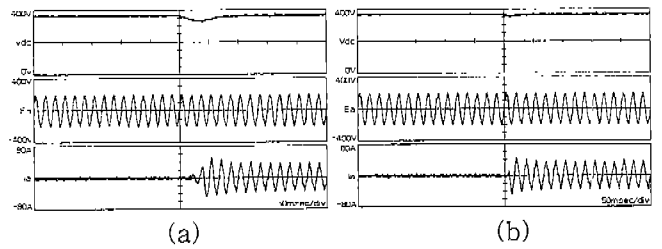


그림 7 과도응답  
(a) 전향보상 안할 경우 (b) 전향 보상을할 경우

전류 전향 보상으로 사용한 결과 DC link 전압이 거의 떨어지지 않음을 알 수 있다. 또한 정상 상태에서도 DC 전압 일정 제어는 입력 센서를 사용했을 때와 거의 동등한 제어 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 8. 결론

본 논문에서는 3상 전압 원 PWM 컨버터의 DC link단 전류를 PWM 스위칭 상태에 따라 샘플링 함으로써 입력 상 전류를 재구축 하는 방법과 이때 발생하는 2샘플링 지연에 대해 논의하였다. 단일 전류 센서를 이용해 제어를 구현 할 때와 종래의 입력 전류 센서를 사용하는 것과 비교해 정상상태나 과도 상태의 특성은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] T.M.Jahns. Motion Control with Permanent-Magnet AC machine. Proceed. of the IEEE, Vol. 2, No. 7, pp. 1241-1252, August 1994.
- [2] T.C. Green, B.W. Williams. Derivation of Motor Line-current Waveforms from the DC-link Current of an Inverter, IEE Proceedings B, Vol.136, No.4, pp.196-203, July 1989
- [3] Moynihan, J.F. et al., State observer based indirect current detection for PM synchronous servo drives, Prec. ICEM, Manchester, pp. 617-621,1991
- [4] F. Blaabjerg, j.k. Pedersen. Single Current Sensor Technique in the DC-link of Three-phase PWM-VS Inverters A Review and the Ultimate Solution. Proceed. of IAS'96, pp. 1192-1202,1996
- [5] J.F. Mognihan, S. Bolognani, R. C. Kavanagh, M.G. Egan, J.M.D.Murphy."Single Current Control of AC Servo Drives Using Digital Signal Processors". Proceed.of EPE '93, Vol. 4, pp.415-421,1993.