

상태관측기를 이용한 3상 PFC 컨버터의 센서리스 제어

김영삼*, 김규태, 박수중, 정한진, 권영안
부산대학교

Sensorless Control of Three-Phase PFC Converter Using State Observer

Y. S. Kim, G. T. Kim, S. J. Park, H. J. Jung, and Y. A. Kwon
Pusan National University

Abstract - 3상 PWM 컨버터는 전원전압과 동일한 위상의 전류를 인가할 수 있도록 스위칭 소자를 사용하여 고효율, 고역률을 얻을 수 있으며, 계통전원의 안정화와 유도장애 해소 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 PWM 컨버터는 전원전압과 동상의 입력전류를 얻기 위해서는 전원전압센서와 전류센서를 필요로 하고 DC 링크단을 제어하기 위해서도 부가적인 하드웨어 구성이 필요하다. 이러한 센서들은 고가이며 신호의 검출시 각종 노이즈와 외란의 영향으로 신뢰성의 저하가 우려되므로 센서의 제거가 요구되고 있다.

본 논문은 상태관측기를 이용하여 전원전압과 위상각을 추정하는 센서리스 제어를 제안하였으며 3상 PFC 컨버터를 구성하여 시뮬레이션과 실험을 수행한 결과 전원전압 추정과 단위역률이 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

최근, 전력 품질에 관한 연구와 경제성을 고려한 다양한 PFC 컨버터에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. PFC PWM 컨버터는 스위칭 소자를 사용하여 전원전압과 동일한 위상의 전류를 인가함으로써 고효율, 고역률을 얻을 수 있다. 그러나 단일 역률 제어를 위해 기본적으로 최소 4개의 센서가 필요하다(전원전압센서, 2개의 전류센서, 출력전압센서). 이러한 센서들은 고가이며 전류, 전압의 검출시 각종 노이즈와 외란의 영향으로 신뢰성의 저하가 우려되므로 센서의 제거가 요구되고 있다. PFC PWM 컨버터의 센서리스 제어의 종류로는 전원전압 센서리스, 전류 센서리스 및 출력전압 센서리스로 나누어지며, 전원전압 센서리스는 동기 위상 검출을 위한 전압센서를 제거하고 측정된 전류나 제어 전압으로 동기 위상을 추정하는 방식이다[1-2]. 전류센서리스는 PWM 스위치의 도통시간에 따른 전류값의 크기를 계산하여 전류값을 추정하는 방식이다[3]. 출력전압 센서리스는 스위칭 상태에 따른 입력측 전압방정식을 재구성하여 출력전압을 추정하는 방식이다[4].

본 논문은 상태관측기를 이용하여 전원전압을 추정하여 동기 위상을 계산하는 센서리스 제어를 제안하였다. 3상 PFC 컨버터를 구성하여 시뮬레이션과 실험을 수행한 결과, 전원전압 추정에 따른 동기 위상과 단위역률이 전원전압 센서를 사용했을 때와 동일하게 잘 실현됨을 확인할 수 있었다.

2. 3상 컨버터 전압방정식

그림 1은 본 논문에서 구성한 3상 PFC SVPWM 승압형 컨버터 시스템이다. 단위역률을 위한 3상 PFC 컨버터 시스템의 제어부는 전압제어기, 전류제어기 및 SVPWM 신호발생부 등으로 구성된다. 그림 1과 같은 3상 승압형 컨버터에서 전압방정식은 다음과 같다.

$$E_a = L_s \frac{di_a}{dt} + V_o \tag{1}$$

$$E_b = L_s \frac{di_b}{dt} + V_b \tag{2}$$

$$E_c = L_s \frac{di_c}{dt} + V_c \tag{3}$$

단, E_a, E_b, E_c 는 전원전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, V_a, V_b, V_c 는 컨버터 단자전압이다.

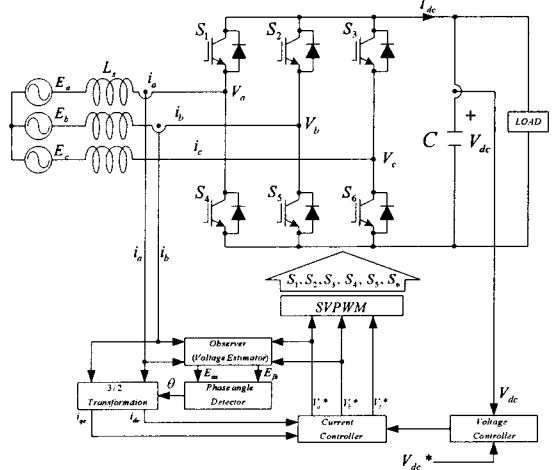


그림 1. 3상 PFC SVPWM 컨버터 시스템 구성도

$d-q$ 축 정지좌표계로 변환하면 전압방정식은 다음과 같다.

$$E_{ds} = L_s \frac{di_{ds}}{dt} + V_{ds} \tag{4}$$

$$E_{qs} = L_s \frac{di_{qs}}{dt} + V_{qs} \tag{5}$$

$d-q$ 축 동기좌표계로 변환하면 전압방정식은 다음과 같다.

$$E_{de} = L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega L_s i_{qe} + V_{de} \tag{6}$$

$$E_{qe} = L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega L_s i_{de} + V_{qe} \tag{7}$$

전원전압이 3상 평형 전압인 경우에 a상 전압의 초기 각을 π 로 하면 3상 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a = -E \sin \omega t \quad (8)$$

$$E_b = -E \sin (\omega t - \frac{2}{3} \pi) \quad (9)$$

$$E_c = -E \sin (\omega t + \frac{2}{3} \pi) \quad (10)$$

식(8)~(10)을 $d-q$ 축 정지좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$E_{ds} = -E \sin \omega t \quad (11)$$

$$E_{qs} = E \cos \omega t \quad (12)$$

식(11)~(12)를 $d-q$ 축 동기좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$E_{de} = 0 \quad (13)$$

$$E_{qe} = E \quad (14)$$

식(13),(14)을 식(6),(7)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$0 = L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega L_s i_{qe} + V_{de} \quad (15)$$

$$E = L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega L_s i_{de} + V_{qe} \quad (16)$$

동기회전좌표계와 공간전압벡터 변조기법을 적용하여 유효성분전류와 무효성분전류를 각각 독립적으로 제한한다. 동기좌표계의 회전각을 d 축 전압이 영이 되도록 설정하고 d 축 전류를 영으로 제어하면 3상 컨버터의 $d-q$ 축 전류에 의한 다음과 같은 역률 식으로부터 단위역률이 실현된다.

$$PF = \frac{i_{qe}}{\sqrt{i_{de}^2 + i_{qe}^2}} \quad (17)$$

3. 상태관측기

정지 기준 좌표계에서 상전류와 상전압을 상태변수로 하는 상태 방정식은 식(18) 및 식(19)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ E_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} V_s \quad (18)$$

$$i_s = C [i_s \ E_s]^T \quad (19)$$

단, $i_s = [i_{as} \ i_{\beta s}]^T$,

$$E_s = [E_{as} \ E_{\beta s}]^T = [-E \sin \theta \ E \cos \theta]^T,$$

$$E = \sqrt{E_{as}^2 + E_{\beta s}^2}, \quad V_s = [V_{as} \ V_{\beta s}]^T,$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_s} \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

상태방정식의 상태변수 중에서 $i_{as}, i_{\beta s}$ 는 컨버터의 입력으로 측정 가능한 상태변수이다. 이러한 전류상태변수를 추정상태변수에서 제외시킨 축소차수 상태관측기를 구성함으로써 연산량이 줄어들고 관측기 설계가 쉬워진다.

전류상태변수를 제외한 상전압 상태변수만으로 구성된 축소차수 상태관측기는 식(20)과 같다.

$$\dot{\hat{z}} = A_{22} \hat{z} + (A_{21} i_s + B_2 v_s) + L(i_s - \hat{i}_s) \quad (20)$$

단, $\hat{z} = [\hat{E}_{as} \ \hat{E}_{\beta s}]^T$

4. 전압제어기 및 전류제어기 구성

3상 AC/DC 컨버터의 출력 링크전압을 제어하기 위하여 그림 2와 같이 링크단 커패시턴스 전압 측정치와 지령전압의 오차를 제어 입력으로 설정하고 제어기를 거친 출력을 q 축 지령 전류로 설정한다.

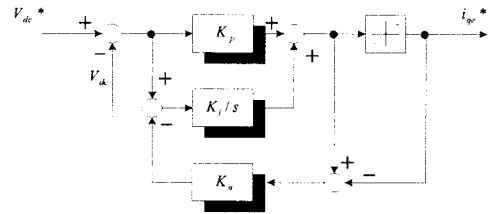


그림 2. 전압제어기 구성

설정된 q 축 지령 전류의 구현을 위하여 그림 3과 같이 전원 전류 측정치와 지령전류의 오차를 제어 입력으로 설정하고 제어기를 거친 출력을 q 축 지령 전압으로 설정한다. 이 지령치와 식(16)으로부터 SVPWM 컨버터의 보상된 q 축 지령 전압은 그림 3과 같이 구성된다.

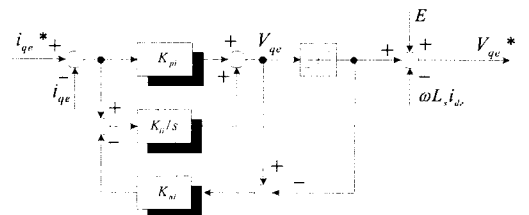


그림 3. 전류제어기 구성

5. 시뮬레이션

이상에서 기술한 3상 PFC PWM 컨버터를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 컨버터회로의 파라미터는 표1과 같다.

표 1. 컨버터 파라미터

주파수	60 Hz	Ls	4 mH
지령전압	100 V	C	2200 μ F
상전압	55 V	부하저항	50 Ω

그림 4, 5는 전원전압센서 없이 추정된 d , q 축 상전압이 실제 전압과 거의 동일함을 보여준다. 그림 6은 추정된 상전압과 실제 상전류의 위상이 일치하여 단위역률이 잘 이루어지고 있음을 나타낸다. 그림 7은 지령전압에 따른 출력전압이 잘 추정됨을 나타낸다.

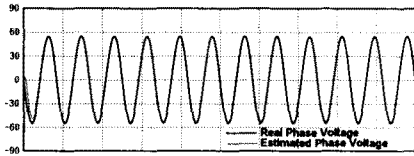


그림 4. d 축 실제 상전압과 추정 상전압 파형

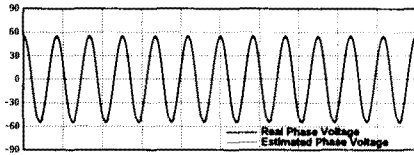


그림 5. q 축 실제 상전압과 추정 상전압 파형

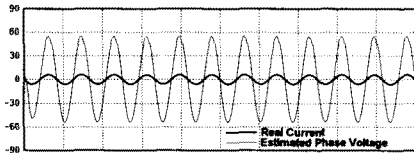


그림 6. 실제 상전류와 추정 상전압 파형

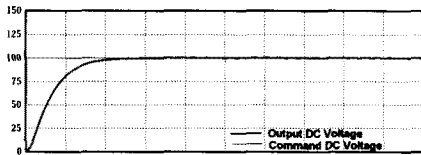


그림 7. 출력전압 응답 파형

6. 실험결과 및 검토

본 논문에서 구성한 3상 PFC PWM 컨버터로부터 실험을 수행하였다. 컨버터 회로의 사양은 시뮬레이션 회로와 같다. 그림 8, 9는 센서없이 추정된 d , q 축 상전압의 실험 결과로서 실제 전압과 거의 동일함을 나타낸다. 그림 10은 추정된 상전압과 실제 상전류의 위상이 일치하여 단위역률이 잘 이루어짐을 나타낸다. 그림 11은 지령전압에 따라 출력전압이 잘 추정됨을 나타낸다.

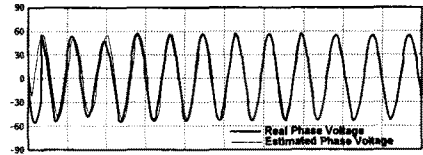


그림 8. d 축 실제 상전압과 추정 상전압 실험 파형

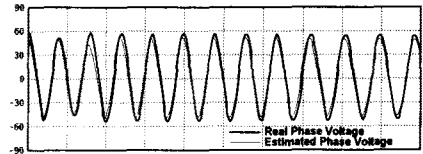


그림 9. q 축 실제 상전압과 추정 상전압 실험 파형

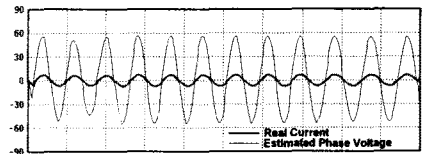


그림 10. 실제 상전류와 추정 상전압 실험 파형

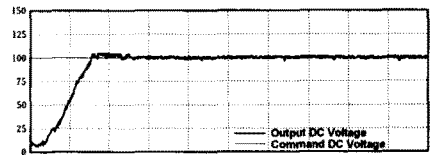


그림 11. 출력전압 응답 실험 파형

7. 결 론

PFC PWM 컨버터는 스위칭 소자를 사용하여 전원전압과 동일한 위상의 전류를 인가함으로써 고효율, 고역률을 얻을 수 있다. 그러나 단일 역률 제어를 위해 기본적으로 최소 4개의 센서가 필요하다. 이러한 센서들은 고가이며 전류, 전압의 검출시 각종 노이즈와 외란의 영향으로 신뢰성의 저하가 우려되므로 센서의 제거가 요구되고 있다. 본 논문에서는 상태관측기를 이용하여 전원전압을 추정하고 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과, 단위역률이 잘 수행되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] T Ohnishi and K Fujii, "Line voltage sensorless three phase PWM converter by tracking control of operating frequency" PCC Proc, pp.247-252, 1997.
- [2] T Noguchi, H Tomiki, S Kondo, and I Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors" IEEE IA-34, no.3, pp.473-479, 1998.
- [3] S Bhowmik, A van Zyl, R Spee, and J H R Enslin, "Sensorless current control for active rectifiers" IEEE IA-33, no.3, pp.765-773, 1997.
- [4] T Ohnuki, O Miyashita, P Lataire, and G Maggetto, "Control of a three-phase PWM rectifier using estimated AC-side and DC-side voltages", IEEE PE-14, no.2, pp.222-226, 1999.