

동기좌표계를 이용한 단상 계통연계형 태양광 인버터의 전류제어 기법

김동근, 최중우, 김흥근  
경북대학교

The Current Control of a Single-phase Grid-tie Photovoltaic PCS in Synchronous Frame

Dong-Geun Kim, Jong-Woo Choi and Heung-Geun Kim  
Kyungpook National University

**Abstract** - 본 논문에서는 동기좌표계를 이용한 단상 계통연계형 태양광 인버터의 새로운 전류제어 기법을 제시한다. 기존의 정지좌표계 단상 인버터 전류제어 방법인 PI제어기와 PR제어기를 먼저 알아보고, 기존의 가상 2상 전류 생성기를 통해 단상 시스템을 동기좌표계 모델에 적용하는 전류제어기법을 기술한다. 그리고 가상 2상 전류 생성기의 새로운 방법을 제안한다. 제안된 전류 생성기는 지령 전류를 이용하여 새로운 전류를 생성하는 것으로 시스템의 안정도와 과도상태 응답특성을 개선하였다. 모의실험을 통해 기존의 방식과 제안된 방식을 비교함으로써 그 우수성을 입증한다.

버터의 전압방정식은 식(1)처럼 표현된다.

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{inv} - v_{grid} \tag{1}$$

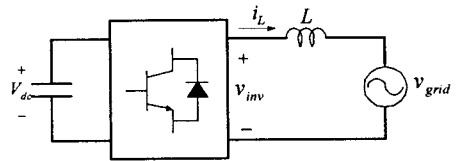


그림 1. 계통연계형 태양광 인버터 시스템

1. 서 론

단상 전류제어 인버터는 고조파 저감장치(Active Power Filters), 역률제어 정류기(Power Factor Control rectifiers), 무정전 전원장치(Uninterrupted Power Supplies), 계통연계형 태양광 발전기 등의 분산전원 제어시스템과 같은 곳에 많이 사용되어진다.

기존 단상 인버터의 전류제어는 사용되는 좌표계에 따라 정지좌표계를 이용한 단상 교류전류제어와 동기좌표계를 이용한 가상 2상 직류전류제어가 있다. 정지좌표계를 이용한 인버터의 전류제어는 PI제어와 PR제어가 대표적이다. PI제어기를 이용하는 정지좌표계 제어 기법은 정상상태오차가 존재하여 향상된 전류제어성능을 얻기 위해서는 정확한 전향보상성분을 보상해야한다<sup>[1]</sup>.

동기좌표계를 이용한 제어 기법은 제어 전류 값이 직류이므로 제어 및 필터링 과정에서 큰 장점을 가진다. 또한 동기좌표계 모델에서 어떤 변수를 직교하는 두 가지 성분으로 분리가 가능하여 유·무효전력의 제어를 용이하게 한다. 따라서 단상 시스템에서도 동기좌표계를 적용한다면 3상 시스템에서 사용되어지는 다양한 알고리즘을 이용할 수 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 단상 시스템에서 동기좌표계 모델 기법은 단상의 정보에서 가상 2상의 정보를 만들어 내야 하기에 많은 어려움이 따른다.

본 논문에서는 단상 계통연계형 태양광 인버터의 두 가지 좌표계 모델을 모두 기술하였다. 먼저 정지좌표계를 이용하여 단상 교류전류제어 기법 두 가지를 서술하고, 동기좌표계를 이용하는 가상 2상 직류전류제어 기법 중 기존의 두 가지 방법과 제안한 방법을 비교하였다. 그리고 모의실험을 통해 결과 파형을 분석하여 그 타당성을 검증하였다.

2.2 정지좌표계를 이용한 단상 인버터 제어기법  
그림 2는 단상 PI제어기를 나타낸다.

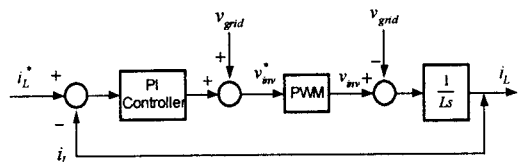


그림 2. 단상 PI제어기 인버터

정지좌표계를 이용한 PI제어기법은 정상상태 오차가 반드시 존재한다. 이를 보완하기 위해 전향보상성분 즉, 지령전류의 미분치와 인덕턴스 L을 곱한 값을 보상해야 한다.

위와 같은 PI제어기법의 단점 때문에 최근에는 계통연계형 인버터의 전류, 전압 제어에 적합한 PR(Proportional Resonant) 제어기가 많이 연구되고 있다. PR제어기를 사용하면 그림 3과 같이 PI제어기와 달리 전향보상성분 없이 지령전류를 제어할 수 있다. 또한 PR제어기는 특정 고조파성분을 선택적으로 보상 할 수 있는 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

2. 본 론

2.1 단상 계통연계형 태양광 인버터

그림 1은 단상 계통연계형 태양광 인버터의 구조이다. v\_grid는 계통전압, v\_mv는 인버터의 출력 전압, i\_L은 인덕턴스 전류, V\_dc는 직류링크 전압을 나타낸다. 단상 인

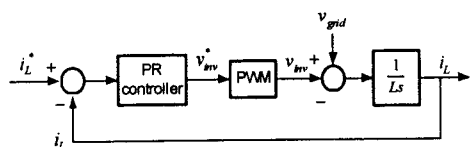


그림 3. 단상 PR제어기 인버터

### 2.3 동기좌표계를 이용한 가상 2상 인버터 제어기법

그림 1의 계통연계형 태양광 인버터의 동기좌표계 모델은 3상 시스템 경우와 같은 방법으로 구현된다.

계통전압( $v_{grid}$ )을 식(2)와 같이 정지좌표계 d축으로 설정한다. 정지좌표계에서 계통전압과 위상차가 90도는 가상 2상 전압은  $v_{grid\_q}$ 이며, 식(3)과 같이 표현된다.

$$v_{grid} = v_{grid\_d}^s = E \cos(\theta) \quad (2)$$

$$v_{grid\_q}^s = E \sin(\theta) \quad (3)$$

인버터의 출력전압( $v_{inv}$ )을 정지좌표계의 d축으로 설정한다. 즉,  $v_{inv\_d}$ 는 정지좌표계에서 d축 인버터의 전압으로  $v_{inv}$ 와 같다.  $v_{inv\_q}$ 는  $v_{inv\_d}$ 와 위상차가 90도는 가상의 q축 인버터 전압이며,  $i_d^s$ 는 정지좌표계에서 인덕턴스에 흐르는 d축 전류를  $i_L$ 과 같다.  $i_q^s$ 는  $i_d^s$ 와 90위상차가 나는 정지좌표계 상의 가상 q축 전류다. dq 정지좌표계 전압방정식은 식(4)와 같다.

$$v_{inv\_dq}^s = L \frac{di_{dq}^s}{dt} + v_{grid\_dq}^s \quad (4)$$

$v_{inv\_d}^e$ ,  $v_{inv\_q}^e$ ,  $i_d^e$ ,  $i_q^e$ 는 각각 정지좌표계에서 변환된 동기좌표계의 d축 전압, q축 전압, d축 전류, q축 전류이다. 동기좌표계의 전압 방정식은 식(5)와 같다.

$$v_{inv\_d}^e = L \frac{di_d^e}{dt} + \omega L i_q^e + v_{grid\_d}^e$$

$$v_{inv\_q}^e = L \frac{di_q^e}{dt} - \omega L i_d^e + v_{grid\_q}^e \quad (5)$$

동기좌표계에서 계통전압( $v_{grid\_d}^e$ ,  $v_{grid\_q}^e$ )은 동기좌표계로의 변환행렬에 의해 식(6)과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} v_{grid\_d}^e \\ v_{grid\_q}^e \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} v_{grid\_d}^s \\ v_{grid\_q}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 가상 2상 동기좌표계 최종 모델은 식(7)과 같다.

$$v_{inv\_d}^e = L \frac{di_d^e}{dt} + \omega L i_q^e + E$$

$$v_{inv\_q}^e = L \frac{di_q^e}{dt} - \omega L i_d^e \quad (7)$$

역률이 1이 되게 제어를 하기 위해서는 동기좌표계 q축의 전류 지령( $i_q^{e*}$ )을 0으로 설정한다. 그림 4는 동기좌표계를 이용한 가상 2상 PI제어기 인버터를 나타낸다.

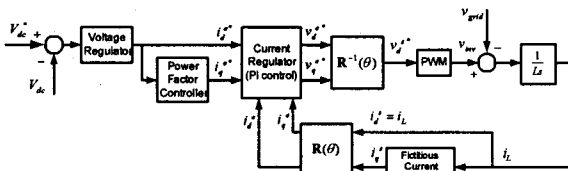


그림 4. 동기좌표계를 이용한 가상 2상 PI제어기 인버터

단상 전류제어기 시스템을 동기좌표계 모델로 변환하기 위해서는 q축에 해당되는 가상의 전류를 구해야 하는 과정이 필요하다.

가상 전류를 얻는 기존의 방법 중 하나는 그림 5처럼 이득이 1이고 위상만 90도연시켜주는 APF(All Pass Filter)를 사용하는 방법이 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 APF를 사용하면 APF에 의한 시간지연으로 인하여 전체적인 시스템의

대역폭이 증가 할수록 안정성에 문제가 생기는 단점이 있다. 이는 제어기의 성능과 관련되어 정상상태에 도달하는 속도가 늦어지게 된다.

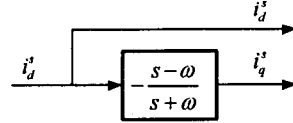


그림 5. APF를 이용한 가상 2상 전류 발생기

가상 전류를 얻는 기존의 또 다른 방법은 상태관측기(Observer)를 이용하는 것이다<sup>[3]</sup>. 관측기의 상태방정식은 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d^s \\ \hat{i}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d^s \\ \hat{i}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} [y - [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{i}_d^s \\ \hat{i}_q^s \end{bmatrix}]$$

$$y = i_L = [1 \ 0] \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} \quad (8)$$

그림 6과 같이 가상 2상 전류 발생기를 전차원 상태관측기로 구하게 되면 관측기의 극점의 위치를 조정함으로써 관측기의 시간지연을 감소시킬 수 있다. 가상 2상 발생기를 APF로 사용하던 시스템의 단점인 대역폭 증가에 따른 안정성의 문제는 발생하지 않는다.

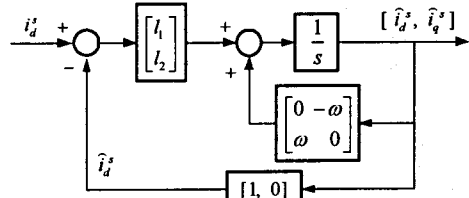


그림 6. 상태관측기를 이용한 가상 2상 전류 발생기

### 2.4 제안한 방식의 가상 2상 전류 발생기

본 논문에서 제안한 가상 2상 전류 발생기는 동기좌표계의 지령 dq축 전류를 이용하는 것이다. 그림 7과 같이 전압 제어기에서 구한 d축 전류 지령과 역률 제어기에서 구한 q축 전류 지령을 dq동기좌표계에서 정지좌표계로의 변환행렬 식(9)에 대입하여 식(10)과 같이 가상 2상 전류를 생성한다.

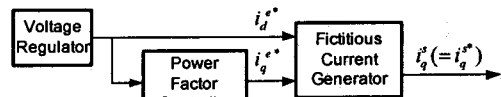


그림 7. 제안한 가상 2상 전류 발생기

$$\begin{bmatrix} i_d^{**} \\ i_q^{**} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$i_q^{**} = i_q^* = i_d^* \sin(\theta) + i_q^* \cos(\theta) \quad (10)$$

### 3. 모 의 실험

모의실험에는 MATLAB Simulink를 사용하였고, 인버

터의 전류 제어기법을 제외한 계통전압의 위상 및 주파수를 추출하는 위상고정루프(PLL : Phase Locked Loop)와 직류링크 전압제어기는 이상적인 것으로 보였다.

표 1. 모의실험 조건

전원전압	220 [V], 60 [Hz]
직류링크 전압	350 [V]
인덕턴스(L)	5 [mH]
PI제어기 제어주파수(BW)	3000 [rad/s]
상태관측기의 극위치	2500 [rad/s]

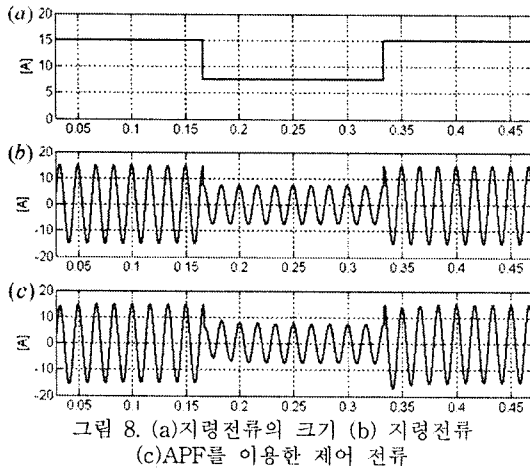


그림 8. (a)지령전류의 크기 (b) 지령전류 (c)APF를 이용한 제어 전류

그림 8의 (a)는 전류 지령의 크기가 정해진 시간에 따라 변하는 과정을 나타낸다. 초기 전류 지령의 크기는 15[A]이고 10주기 이후에는 7.5[A]로 그 값이 반으로 떨어지고 다시 10주기 이후에는 초기 값 15[A]로 되돌아가는 파형을 나타낸다.

그림 8의 (c)는 제어기 대역폭이 3000[rad/s]일 때, APF를 이용하여 가상 2상 전류를 생성하여 동기좌표계를 이용한 인버터 전류 제어 결과 파형을 보여준다. 과도응답 시간이 느린 것을 알 수 있다. 제어기 대역폭이 3000 [rad/s]보다 더 커지면 발산하게 되어 시스템의 안정도에 문제가 야기된다. 따라서 동기좌표계 모델에서 APF를 이용한 방법은 APF에 의한 시간지연으로 인해 대역폭을 높일 수 없는 단점이 있어 다른 전류 제어기와 비교 대상에서 제외하고, 전차원 상태 관측기를 사용한 제어기법과 제안된 전류 생성기를 사용한 제어기법을 모의실험으로 비교, 검토한다.

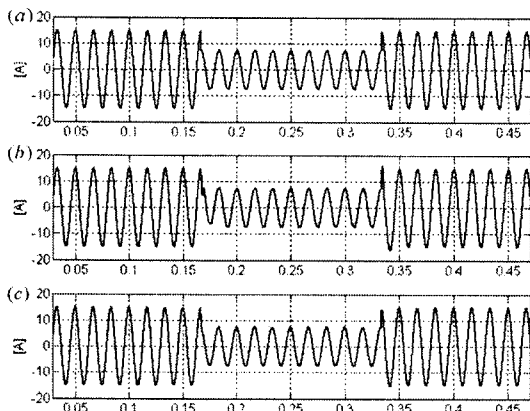


그림 9. (a) 전류 지령 (b) 전차원 상태관측기를 이용한 전류 제어 (c) 제안한 방법을 이용한 전류제어

그림 9에서는 제어기 대역폭이 3000[rad/s]이지만 APF를 이용할 때 나타났던 안정도의 문제는 보이지 않는다. 즉 전차원 상태관측기를 이용하는 방법과 제안한 방법은 제어기의 대역폭을 높일 수 있어, APF를 이용하는 방법보다 더 빠른 반응속도를 기대할 수 있다.

그림 10은 전차원 상태관측기와 제안된 방법 두 가지 제어기의 과도상태 전류 오차의 크기를 보여준다. 오차의 크기 파형에서 0.16초와 0.195초 사이, 0.325초와 0.368초 사이의 과도상태를 확대한 것으로 기존의 전차원 상태관측기를 사용한 제어기법보다 제안된 제어기법이 과도상태 오차의 크기가 작게 나왔음을 나타낸다.

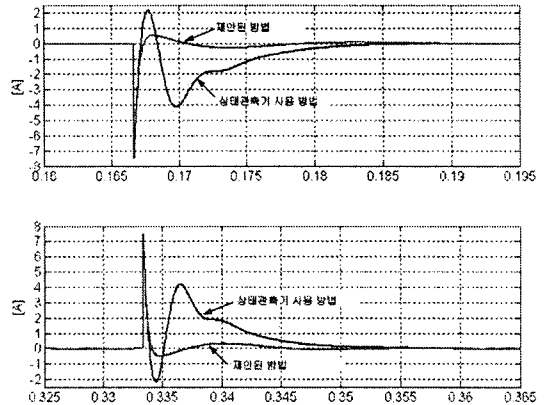


그림 10. 전차원 상태관측기 방법과 제안된 방법의 전류 제어 오차 비교

#### 4. 결 론

본 논문은 단상 계통연계형 태양광 인버터의 전류 제어 기법을 두 가지 좌표계 모델로 설명하였다. 또한 새로운 가상 2상 전류 발생기를 제안하여 단상 계통연계형 태양광 인버터를 동기좌표계 모델로 구현하였다. 제안된 방법은 기존의 APF를 이용하는 방법과 상태관측기를 이용하는 방법보다 제어기 대역폭의 조정에 자유로웠고, 과도상태 오차의 크기가 작은 것을 모의실험을 통해서 검토하였다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성 사업의 연구결과입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Teodorescu, R, Blaabjerg, F, Liserre, M, Loh, P.C "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volume 153 Issue 5 Page(s):750 - 762, September 2006
- [2] Rae-Young Kim, See-Young Choi, In-Young Suh, "Instantaneous control of average power for grid tie inverter using single phase D-Q rotating frame with all pass filter," Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE, Volume 1 2-6, Page(s):274 -279 Vol. 1, Nov. 2004
- [3] Saritha, B, Jankiraman, P.A, "Observer based current control of single-phase inverter in DQ rotating frame," Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06. International Conference on, 12-15, Page(s):1 - 5, Dec. 2006