

# LCL 필터를 사용하는 계통연계 인버터의 상태 궤환 제어기 설계

윤승진, 김경화\*  
서울과학기술대학교

## Design of a State Feedback Controller for a Grid-connected Inverter with LCL Filter

Seung Jin Yun, Kyeong Hwa Kim  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

계통연계 인버터 시스템은 기존 L 필터보다 낮은 THD를 가지며 저가격의 작은 부피로도 효율적으로 고조파를 저감할 수 있는 LCL 필터를 많이 사용하고 있다. LCL 필터를 가지는 계통연계 인버터의 제어를 위해서는 PI 제어기가 사용되고 있으며 일반적으로 다수의 PI 제어기가 사용되고 있어 많은 제어기 이득을 동시에 설계해야 하는 한계를 지닌다. 본 논문에서는 LCL 필터를 갖는 3상 계통연계 인버터의 상태공간 모델을 이용하여 상태공간에서의 상태 궤환 제어기의 설계기법을 제시한다. 상태 궤환 제어기를 적용함으로써 다수의 PI 제어기 이득을 설계하는 번거로움을 줄일 수 있으며 체계적인 과정으로 제어기가 설계될 수 있다. 제안된 기법의 타당성과 성능이 PSIM 시뮬레이션을 통하여 입증된다.

### 1. 서론

신재생 에너지를 이용하는 분산전원과 에너지 저장 시스템의 수가 증가하면서 계통연계 인버터의 사용이 빈번해지고 있다. 이에 따라 계통연계 인버터의 경제성 향상과 고조파 감소를 위해 대부분의 응용에서는 기존의 L필터보다 저가격의 작은 부피로 효율적인 고조파 저감이 가능한 LCL필터를 사용하고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 LCL필터를 사용하는 계통연계 인버터의 제어를 위해서는 다수의 PI 제어기가 사용되고 있어 많은 제어기 이득을 동시에 설계해야 하는 한계를 지닌다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 LCL 필터를 사용하는 계통연계 인버터의 제어를 위해 상태공간 모델에서 적분기를 사용한 상태 궤환 제어기의 설계기법을 제시한다. LCL필터를 가지는 계통연계 인버터의 상태방정식에서 계통전압은 외란 성분으로 작용하며 일반적인 상태 궤환 제어기의 설계 시 정상상태 오차가 출력에 나타난다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 기존의 상태 궤환 제어기에 적분기를 추가함으로써 시스템 출력에 작용하는 계통전압의 영향을 줄이고 영의 정상상태 오차를 가지는 제어 성능을 구현한다. 제안된 방법을 통해 시스템 출력인 계통전류 뿐만 아니라 시스템 상태인 인버터 전류 및 필터 캐패시터 전압이 하나의 제어기 설계과정을 통해 체계적인 방법으로 제어 이득이 설계된다. 제안하는 적분기를 사용한 상태 궤환 제어기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증된다.

\* 교신저자

### 2. 모델링 및 상태 궤환 제어

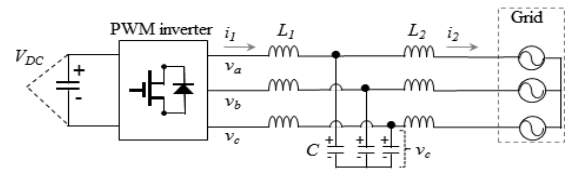


그림 1 3상 계통연계 인버터  
Fig. 1 Three-phase grid-connected inverter

그림 1은 LCL 필터를 가지는 3상 계통연계 인버터를 나타낸다. 위 그림에 대응하는 계통연계 인버터의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_g v_g \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $x = [i_1^q \ i_1^d \ i_2^q \ i_2^d \ v_c^q \ v_c^d]^T$ 는 상태벡터,  $u = [v^q \ v^d]^T$ 는 인버터 전압,  $v_g = [v_g^q \ v_g^d]^T$ 는 계통전압,  $y = i_2 = [i_2^q \ i_2^d]^T$ 는 출력인 계통 qd 전류,  $i_1 = [i_1^q \ i_1^d]^T$ 은 인버터측 qd 전류 및  $v_c = [v_c^q \ v_c^d]^T$ 는 캐패시터 qd 전압이며 각주파수가  $w$ 일 때 시스템 행렬 및 입력행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & w & 0 & 0 & 1/L_1 & 0 \\ -w & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_1 \\ 0 & 0 & 0 & w & 1/L_2 & 0 \\ 0 & 0 & -w & 0 & 0 & 1/L_2 \\ 1/C & 0 & -1/C & 0 & 0 & w \\ 0 & 1/C & 0 & -1/C & -w & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/L_2 & 0 \\ 0 & 1/L_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

LCL 필터를 사용하는 계통연계 인버터에서 일반적인 상태 궤환 제어기는 식 (1)에서 계통전압  $v_g$ 가 외란으로 나타나 정

상상태 오차가 출력에 나타난다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 시스템 상태에 적분기를 추가하여 계통연계 인버터의 최종 출력인 계통측 qd 전류가 정상상태 오차 없이 시스템 제어 명령을 효과적으로 추종할 수 있도록 설계한다. 이를 위해 적분 상태변수  $x_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{x}_i = r - y \quad (2)$$

여기서  $r = i_2^*$ 는 계통 전류의 명령치를 나타낸다. 이를 이용하면 시스템 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_g v_g \\ \dot{x}_i &= r - Cx \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} B_g \\ 0 \end{bmatrix} v_g \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 상태 방정식에서 제어입력 행렬  $u$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = [K_2 \ K_1] \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $K_2$ 는 궤환제어 이득이며  $K_1$ 은 적분 상태변수의 이득이다. 그림 2는 제안된 적분기를 이용한 상태 궤환 제어기의 구조이다. 제어기 이득은 극점 배치 기법을 사용한다.

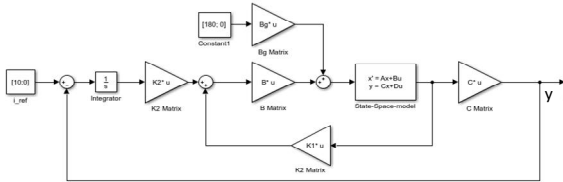


그림 2 제안된 적분기를 이용한 상태 궤환 제어기  
Fig. 2 Proposed state feedback controller with integrator

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 PSIM 시뮬레이션이 수행되었다. q축 전류명령은 10[A], 계통 상전압의 크기는 180[Vrms], 계통의 주파수는 60[Hz]이다. 그림 3은 시스템 출력인 계통측 qd 전류의 제어 과형이며 출력전류가 명령치를 신속히 추종함을 확인할 수 있다. 그림 4, 그림 5 및 그림 6은 각각 LCL 필터의 계통 측 상전류, 인버터 측 상전류 및 캐패시터의 전압 과형을 나타낸다.

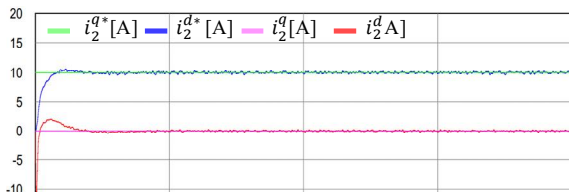


그림 3 계통 측 qd 전류의 시뮬레이션 결과  
Fig. 3 Simulation results for grid side qd currents.

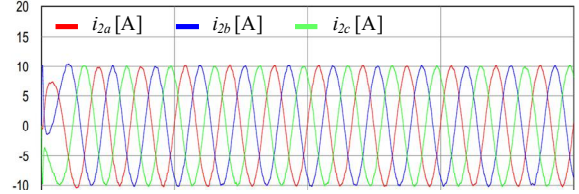


그림 4 계통 측 상전류의 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results for grid side phase currents.

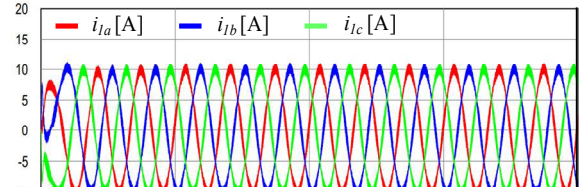


그림 5 인버터 측 상전류의 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation results for inverter side currents.

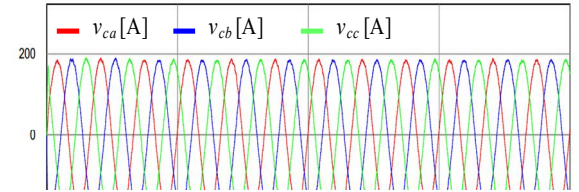


그림 6 캐패시터 전압의 시뮬레이션 결과  
Fig. 6 Simulation results for capacitor voltage.

### 4. 결론

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 계통연계 인버터의 제어를 위해 상태공간 모델에서 적분기를 사용한 상태 궤환 제어기의 설계기법을 제시하였다. 외란 성분으로 작용하는 계통전압에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분기를 추가한 상태 궤환 제어기가 설계되었다. 기존의 LCL필터를 사용하는 계통연계 인버터의 제어를 위해 다수의 PI 제어기를 사용하는 방식에 비해 제안된 기법은 상태공간 모델에서 하나의 제어기만을 사용하여 체계적으로 제어기 이득 설계를 수행할 수 있다.

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 철도기술연구사업(16RTRP B084184 04)의 일환으로 수행되었음

### 참고 문헌

- [1] N. Panten, N. Hoffman, and F. W. Fuchs, "Finite Control Set Model Predictive Current Control for Grid Connected Voltage Source Converters With LCL Filters: A Study Based on Different State Feedbacks," IEEE Trans. on Power Electron., Vol. 31, No. 7, pp. 5189-5200, 2016, July.
- [2] Y. Prabowo, M. Kwon, S. Park, and S. Choi, "Improved Indirect Current Control for Utility Interactive Inverter System with Critical Load." In Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2016 3rd Conference on (pp. 1-5). IEEE 2016, November