

# 계통연계 인버터의 전력품질 개선을 위한 다중 공진제어 기반 슬라이딩모드 제어기법

윤승진, 김경화†  
서울과학기술대학교

## Multiresonant Sliding Mode Control Scheme to Improve Power Quality of LCL filtered Grid-connected Inverter

Seung-Jin Yoon, Kyeong-Hwa Kim †  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 3상 계통연계 인버터의 그리드 전류 오차를 개선하고 고조파 왜곡 현상을 억제하기 위해 다중 공진 제어 기법을 슬라이딩 평면에 적용한 슬라이딩 제어기(SMC)를 제시한다. 일반적으로 시스템 파라미터가 변경되거나 계통에 외란이 발생할 경우 슬라이딩 평면이 표류하는 현상이 나타나며 이러한 표류 현상은 시스템 정상상태 오차와 시스템에 고조파 왜곡 현상을 일으키고 계통연계 인버터의 전류 품질에 심각한 영향을 미치게 된다. 이러한 현상을 해결하기 위해 적분 함수가 추가된 SMC가 제안되었으나 해당 제어기는 효과적으로 정상상태 오차를 제거하는 반면 슬라이딩 평면의 표류현상을 충분히 줄여주지 못하는 한계를 가지고 있다. 이러한 정상상태 오차와 표류현상을 제거하기 위해 다중 공진 제어 조건을 슬라이딩 평면 함수에 추가한 제어기를 제시한다.

### 1. 서론

마이크로그리드 구성 및 신재생 에너지를 이용하는 분산전원 발전량이 증가함에 따라 계통연계 인버터의 수요가 증가하면서 인버터의 빠른 과도응답, 파라미터 변경에 따른 강인성 및 고조파 감소에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 비례적분제어, 비례공진제어, 모델예측제어 및 반복제어기법 같은 선형제어기의 경우 교류 명령치를 추정하지 못하거나 특정 외란만을 보상하여 다양한 계통 외란 조건에 취약하며 시스템 파라미터 변경에 따라 제어기의 성능에 제한을 가져오게 된다<sup>[1]</sup>.

이러한 문제를 해결하기 위해 비선형 제어기법인 슬라이딩모드 제어기법이 제시되었으나 기존의 슬라이딩모드 제어기법의 경우 파라미터 변경 또는 외란이 존재할 때 슬라이딩 평면이 표류하는 현상이 나타나며 이러한 표류 현상은 시스템 정상상태 오차와 고조파 왜곡 현상을 일으키게 되어 계통연계 인버터의 전류 품질에 심각한 영향을 미치게 된다<sup>[2]</sup>. 이를 해결하기 위해 적분 함수가 추가된 SMC가 제안되었으며 해당 제어 기법은 정상상태 오차를 효과적으로 줄여주고 파라미터 변경에 따른 강인성은 보장하지만 계통 외란에 따른 슬라이딩 평면의 표류현상을 충분히 줄여주지 못하여 계통연계 인버터의 전류 품질에 영향을 미치게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 우수한 동적 응답 및 파라미터 변경에 강인성을 가지는 기존의 슬라이딩 모드 제어기에 다중공진 제어조건을 슬라이딩 평면에 적용한 제어기법을 제시한다. 해당 제어기법은 계통 외란에 의해 발생하는 슬라이딩 평면의 표류 현상으로 인한 시스템의 정상상태 오차와 출력의 고조파 왜곡 현상을 보상한다. 제안된 제어기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증된다.

### 2. 시스템 모델링

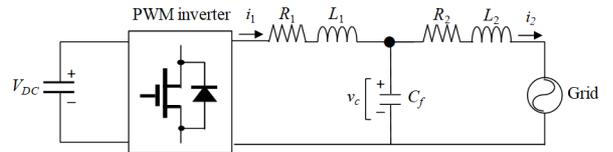


그림 1. LCL 필터를 가지는 3상 계통연계 인버터

그림 1은 LCL 필터를 가지는 3상 계통연계 인버터를 나타낸다. 고정 좌표계에서 각 시스템 상태에 대한 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{x}_{1\alpha\beta} = \mathbf{i}_{1\alpha\beta} - \mathbf{i}_{1\alpha\beta}^*, \quad \mathbf{x}_{2\alpha\beta} = \mathbf{v}_{c\alpha\beta} - \mathbf{v}_{c\alpha\beta}^*, \quad \mathbf{x}_{3\alpha\beta} = \mathbf{i}_{2\alpha\beta} - \mathbf{i}_{2\alpha\beta}^* \quad (1)$$

위 식에서  $i_1$  은 인버터측 전류,  $v_c$  는 캐패시터측 전압,  $i_2$  는 계통측 전류, 및 “\*”는 명령치를 나타낸다. 고정 좌표계에서 인버터 모델은 결합항이 없이 분리되므로  $\alpha$  축과  $\beta$  축 모델이 동일하다. 따라서  $\alpha$  축 상태방정식을 이용해 설계한 제어기는  $\beta$  축에도 동일하게 적용된다.  $\alpha$  축 인버터 모델의 제어기 설계를 위한 명령치는 계통측 전류와 전압을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} i_{2\alpha}^* &= I_{2\alpha} \sin(\omega t) \\ v_{c\alpha}^* &= L_2 I_{2\alpha} \omega \cos(\omega t) + v_{g\alpha} \\ i_{1\alpha}^* &= I_{2\alpha} \sin(\omega t) - C_f L_2 I_{2\alpha} \omega^2 \sin(\omega t) + C_f \dot{v}_{g\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\omega$  는 계통전압의 각주파수,  $v_{g\alpha}$  는  $\alpha$  축 계통전압,  $I_2$  는 계통전류의 크기를 나타낸다. LCL 필터를 가지는 3상 계통연계 인버터의 상태 방정식과 식 (2)로부터 다음의 시스템 상태방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}_\alpha + \mathbf{B}\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{D}_\alpha \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{X} = [x_{1\alpha} \quad x_{2\alpha} \quad x_{3\alpha}]^T$ ,  $\mathbf{u} = [v_{c\alpha} \quad 0 \quad 0]^T$

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

$$D = \begin{bmatrix} -v_{ca}^* / L_1 - di_{1a}^* / dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3. 슬라이딩모드 제어기 설계

본 논문에서는 계통전류에 포함된 고조파를 효과적으로 제거하기 위해 다중 공진제어 조건을 슬라이딩 평면에 추가하여 다음과 같이 슬라이딩 평면을 정의한다.

$$\dot{\sigma} = C [x_{1\alpha} \ x_{2\alpha} \ x_{3\alpha}]^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{s}{s^2 + (n\omega)^2} x_{3\alpha} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

여기서  $C = [c_1 \ c_2 \ c_3]$ ,  $n = 1, 5, 7, 11, 13$  은 각 고조파 차수를 나타내며,  $c_1, c_2, c_3$  는 각 상태 정상상태 오차에 대한 가중치를 나타낸다. 이를 통해 가변 구조 제어입력은 시스템 모델과 W. Gao가 제시한 Reaching Law로부터 다음과 같이 결정된다.

$$CAX_{\alpha} + CBu_{\alpha} + CD_{\alpha} + C \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{s}{s^2 + (n\omega)^2} x_3 \end{bmatrix}^T = -k\sigma_{\alpha} - \varepsilon \text{sgn}(\sigma_{\alpha}) \quad (5)$$

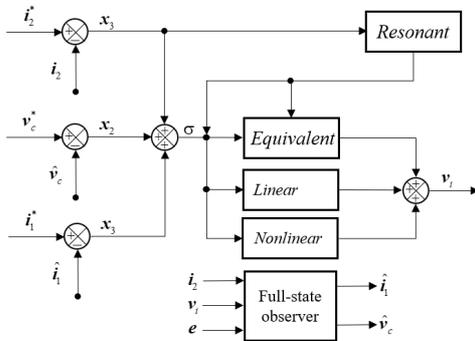


그림 2. 다중 공진제어 기반 슬라이딩모드 제어기

그림 2는 제안된 슬라이딩 모드 제어기의 블록 다이어그램이다. 제안된 제어기법에서 전상태 관측기를 통해 인버터측 전류와 캐패시터측 전압이 추정되며 추정치는 각 상태 오차를 구한 후 슬라이딩 제어기를 설계하는데 사용된다. 이를 통해 제어기 설계에 필요한 센서를 줄여 시스템의 경쟁력을 향상시키고 복잡성을 줄인다.

### 4 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 PSIM 시뮬레이션이 수행되었다. 제안된 기법의 강인성을 확인하기 위해 그림 3의 왜곡된 계통전압, 계통 임피던스 변화 및 주파수 변동이 사용되었다. 그림 3의 계통전압은 제어기의 외란 제거 성능을 입증하기 위해 고조파가 포함된 계통전압 파형이며 5차, 7차 및 11차 고조파가 포함되었다. 그림 4는 계통 임피던스 변화 시 3상 계통전류의 응답특성을 나타낸다. 그림 5는 계통측 주파수 변화에 따른 제어기의 응답을 나타낸다. 마지막으로 그림 6은 제어기의 명령치가 변화하였을 때의 과도응답 결과이다. 각각의 파형에서 파라미터 변화 시점은 0.1s로 동일하다.

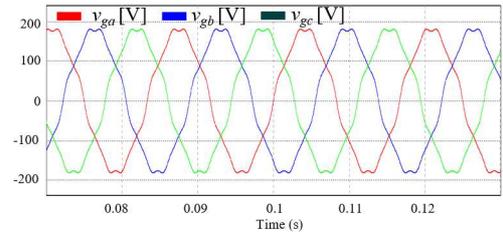


그림 3. 왜곡된 계통전압 파형

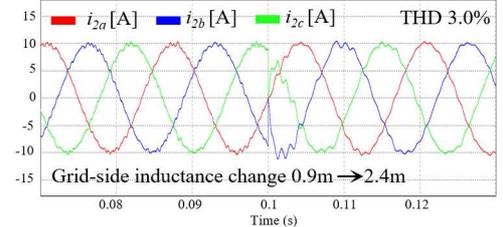


그림 4. 계통측 임피던스 변화 시 3상 계통전류 응답

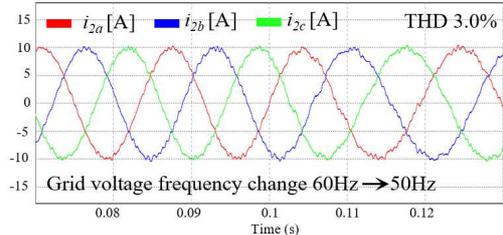


그림 5. 계통전압 주파수 변화 시 3상 계통전류 응답

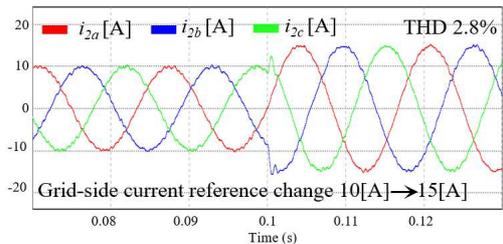


그림 6. 전류명령 변화 시 제어기의 과도응답 특성

### 5 결론

본 논문은 왜곡계통에서 LCL 필터를 사용하는 3상 계통연계 인버터의 빠른 과도응답 및 고조파 억제에 대해 다중 공진제어 기반 슬라이딩모드 제어기를 설계하였다. 슬라이딩 모드 제어에 사용하는 상태변수를 위해 전상태 관측기를 사용하여 상태변수를 추정하였다. 계통 임피던스 변화 및 주파수 변동에 대해 제어기의 강인한 특성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2016R1D1A1B03930975).

### 참고 문헌

[1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems." IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 53, No. 5, pp 1398-1409, 2006, Oct.  
 [2] X. Hao, X. Yang, T. Liu, "A sliding-mode controller with multiresonant sliding surface for single-phase grid-connected VSI with an LCL filter." IEEE Trans. Power Electr., Vol. 28, No. 5, pp 2259-2268, 2013, May.