

# LCL 필터 계통 연계 인버터 수동성 기반 제어 안정화 설계

김기룡, 신동설, 이종필, 오창열  
한국전기연구원

## Passivity-Based Stability of LCL-Type Grid-Connected Inverter

Kiryong Kim, Dongsul Shin, Jong-Pil Lee, Chang-Yeol Oh  
Korea Electrotechnology Research Institute

### ABSTRACT

주파수 영역 수동성 이론은 분산 발전과 같은 복잡한 계통 조건에 연결되는 인버터의 안정성을 평가하는 효과적인 방법을 제공한다. 인버터의 출력 어드미턴스가 음이 아닌 실수 부분을 갖는 영역 내에 속하면 일반적으로 인버터는 안정적이라고 판단한다. LCL 타입의 인버터의 전류제어 시 공진 주파수가 샘플링 주파수의 1/6보다 높을 때 계산 및 펄스폭 변조 지연으로 인해 의도치 않게 인버터의 음의 실수 영역이 존재하여 시스템이 불안정하게 만든다. 따라서, 본 논문에서는 계통 전압 피드포워드 및 위상 보상을 통해 음의 실수 영역을 최소화하여 인버터의 안정성을 높이고자 한다. 제안한 방식의 이론적 분석의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

기존 전력망에서 인버터 기반 전력 생산의 비중이 증가하고 있으며, 계통 연계 인버터는 태양광 및 풍력 등 재생 에너지 기반 발전을 유연하고 효율적으로 계통에 통합하는 데 널리 사용되고 있습니다<sup>[1]</sup>. 이러한 인버터는 효율적인 전력 변환을 가능하게 하지만, 댐핑이 제대로 되지 않을 경우 인버터와 계통 간의 상호 작용, 예를 들어 공진이 발생하여 시스템의 불안정을 초래할 수 있습니다. 주파수 기반 수동성 이론은 분산 발전과 같은 복잡한 계통 조건에 연결된 인버터의 안정성을 평가하는 효과적인 방법을 제공합니다. 이 이론은 전력 네트워크가 수동 부품으로만 구성된다는 가정에 기반하며, 계통에 연결된 인버터와 같은 모든 전력 변환기가 수동적이라면 다시 말해, 각 변환기의 출력 어드미턴스의 실수 부분이 음수가 아니라면 시스템 설계상 안정성이 보장된다는 것을 의미합니다<sup>[2]</sup>.

LCL 필터는 스위칭 고조파를 제거할 수 있는 고조파 감쇠 능력과 낮은 인덕턴스로 인해 계통 연계 인버터에 일반적으로 사용됩니다. 그러나 LCL 필터의 고유한 공진 위험은 인버터 시스템을 불안정하게 만들 가능성이 있으며, 이를 해결하기 위한 여러 연구가 진행 중입니다<sup>[3]</sup>.

LCL 필터의 인버터 전류 제어에서 샘플링 주기( $T_s$ )를 기준으로 계산 지연과 PWM 지연의 시간 지연( $1.5T_s$ )이 주어지면, 출력 어드미턴스의 실수 부분이 임계 주파수( $T_s/6$ )보다 높은 영역에서 음수가 됩니다. 따라서 LCL 필터의 공진 주파수가 임계 주파수보다 낮은 지점에서 작동하도록 설계되어야 합니다<sup>[4]</sup>. 그러나 계통 연계 연결 운전 중 계통의 임피던스 변화로 인

해 공진 주파수가 의도치 않게 임계 주파수보다 높은 지점으로 변할 가능성이 있어, 시스템이 불안정해질 수 있습니다.

본 논문에서는 임계 주파수보다 높은 지점에서 출력 어드미턴스의 실수 부분이 음수가 되지 않도록 캐패시터 전압 피드백을 통해 인버터 전류를 제어하였으며, 수동성 기반 안정성 기법을 통해 시스템의 안정성을 분석하였으며, 시뮬레이션을 통해 검증하였습니다.

## 2. 시스템 구성 및 모델링

### 2.1 시스템 구성

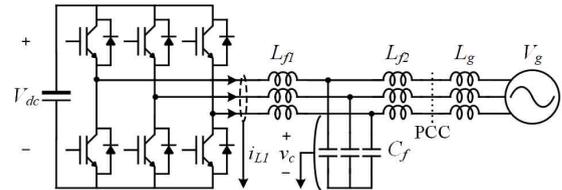


그림 1 3상 계통 연계 LCL 필터 인버터 시스템 구성  
Fig. 1 System configuration of a grid-connected three-phase LCL-filtered inverter.

그림 1은 3상 계통 연계 LCL 필터 인버터 시스템 구성을 나타내고 있다.  $L_f$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ 는 각각 LCL 필터의 인버터 측 인덕터, 계통 측 인덕터, 필터 커패시터를 나타내고 있다.  $L_g$ 는 계통 임피던스를 표현하기 위한 인덕터이다. 계산의 간소화를 위해 각 소자의 기생성분은 무시하였다.  $i_{LL}$ ,  $v_c$ 는 각각 제어에 사용하기 위한 인버터 측 전류와 커패시터 전압을 나타낸다.

### 2.2 시스템 모델링

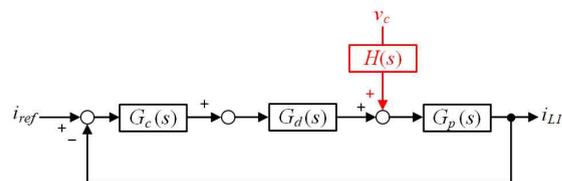


그림 2 제안하는 알고리즘이 적용된 제어 블록도  
Fig. 2 Control block diagram with proposed algorithm.

그림 2는 제안하는 알고리즘이 적용된 제어 블록도를 보여 준다. 검은색으로 표시된 부분이 기존 전류제어의 제어 블록도

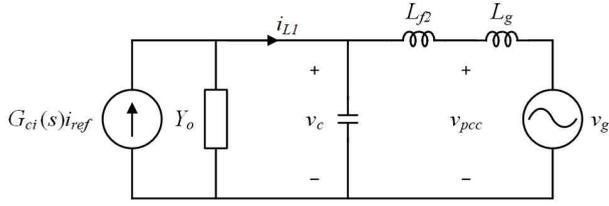


그림 3 인버터 측 전류 제어하는 계통연계 인버터 등가회로  
Fig. 3 Grid-connected inverter equivalent circuit that controls the inverter side current.

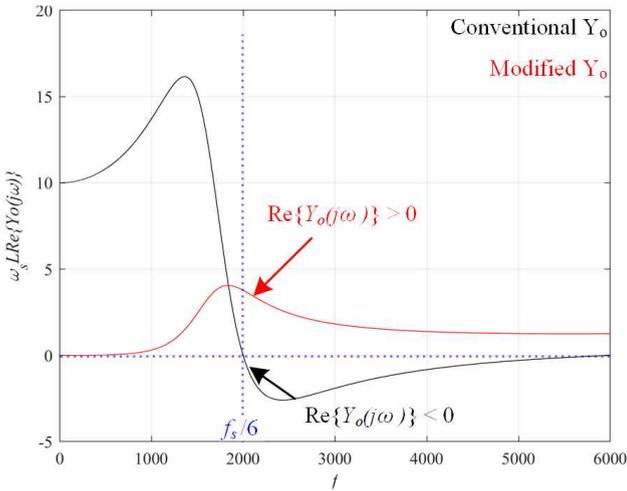


그림 4 인버터 출력 어드미턴스 실수부  
Fig. 3 Grid-connected inverter output admittances.

를 나타내며, 붉은색으로 표시된 부분이 계통 임피던스 변화로 인해 임계 주파수보다 공진 주파수가 더 높은 영역에서 운전할 경우, 시스템의 안정성을 확보하기 위해 제안된 부분이다.  $G_c(s)$ 는 전류제어를 위한 PR제어기의 전달함수이며,  $G_d(s)$ 는 시 지연에 대한 전달함수,  $G_p(s)$ 는 인버터 측 전류제어를 위한 플랜트 전달함수,  $H(s)$ 는 커패시터 전압 능동 댐핑을 위한 전달함수를 각각 나타내고 있다.

그림 3은 제어 블록도를 바탕으로 인버터 측 전류 제어 시 계통연계 인버터의 등가회로를 보여준다.  $G_{ci}(s)$ 는 폐회로 시스템의 전달함수를 나타내며,  $Y_o(s)$ 는 인버터 출력의 어드미턴스를 나타내며, 다음과 같은 수식으로 표현이 된다.

$$i_{L1}(s) = G_{ci}(s)i_{ref} - Y_o(s)v_c(s) \quad (1)$$

$$G_{ci}(s) = \frac{G_c(s)G_d(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_d(s)G_p(s)} \quad (2)$$

$$Y_o(s) = \frac{G_p(s)H(s)}{1 + G_c(s)G_d(s)G_p(s)} \quad (3)$$

$$G_c(s) = K_p + K_r \frac{\cos(\phi)s - h\omega_o \sin(\phi)}{s^2 + \omega_c s + (h\omega_o)^2} \quad (4)$$

$$G_d(s) = e^{-1.5T_s s} \quad (5)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{sL_{f1}} \quad (6)$$

$$H(s) = K_{ad} C_f s \quad (7)$$

그림 4는 인버터 출력 어드미턴스의 실수분을 나타내고 있다. 검은색으로 표현된 부분은  $Y_o$ 은  $H(s)=1$ 인 경우로, 샘플링 주파수의 1/6이 되는 지점인 임계 주파수 이상에서 출력 어드미턴스의 실수부가 음수가 되는 것을 확인할 수 있다. 공진 주파수가 이 영역에 존재하게 되면, 시스템이 불안정해 질 수 있기 때문에 커패시터 전압을 이용한 능동댐핑을 추가하여 임계 주파수 범위 이상에서도 실수부가 음수가 되지 않도록 하였다.

### 3. 시뮬레이션

표 1 계통 연계 인버터 시뮬레이션 파라미터  
Table. 1 Parameters of grid-connected inverter simulation

Vg,ph [V]	220	Vdc [V]	750
fg [Hz]	60	fs [kHz]	12
Lf1 [mH]	1.5	Lf2 [mH]	0.5
Cf [μF]	20	Lg [mH]	10 / 0.1

표 1은 계통 연계 인버터 시뮬레이션을 위한 파라미터를 보여준다. 12kHz 샘플링 주파수를 가지며, 계통 인덕턴스를 변경해 공진 주파수를 변화시켰다. 이를 통해, 임계 주파수보다 공진 주파수가 낮거나 높은 영역에서 시뮬레이션이 진행될 수 있도록 하였다.

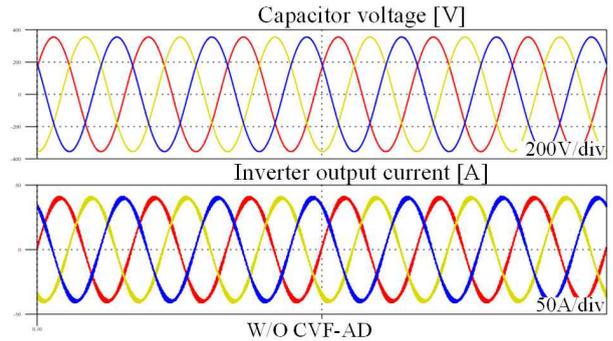


그림 5 공진 주파수가 임계 주파수보다 낮은 영역에 있을 때, 기존 제어 시뮬레이션 파형  
Fig. 5 Conventional control algorithm simulation result under  $f_{crit} < f_{res}$  condition.

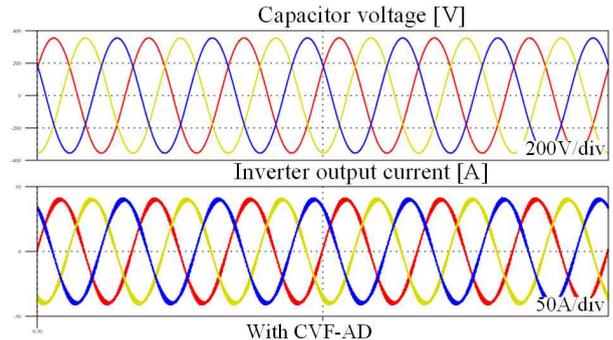


그림 6 공진 주파수가 임계 주파수보다 낮은 영역에 있을 때, 제안하는 알고리즘 적용된 제어 시뮬레이션 파형  
Fig. 6 Proposed control algorithm simulation result under  $f_{crit} < f_{res}$  condition.

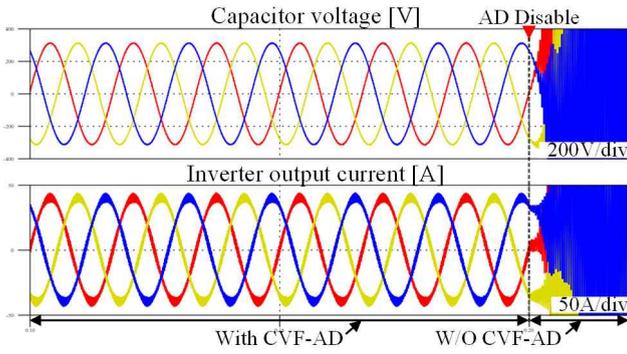


그림 7 공진 주파수가 임계 주파수 이상일 때, 제안하는 제어 방법 유무에 따른 시뮬레이션 파형

Fig. 7 Simulation results with and without the proposed control method when  $f_{res} > f_{crit}$ .

그림 5는 LCL 필터의 공진 주파수가 시스템의 임계 주파수보다 낮은 영역 ( $f_{crit} > f_{res}$ )에서 제안하는 방식을 적용하지 않아도 정상적으로 전류제어가 잘 동작하는 것을 보여주고 있으며, 그림 6은 그림 5와 동일한 조건에서 제안하는 방식을 적용하였을 때, 전류제어가 잘 동작하는 것을 보여준다.

그림 7은 계통 임피던스의 변화로 인해 LCL 필터의 공진 주파수가 시스템의 임계 주파수보다 높은 영역 ( $f_{crit} < f_{res}$ )에서 동작할 때의 시뮬레이션 파형을 보여준다. 제안하는 방식으로 계통 연계 인버터가 동작하면, 전류 제어가 정상적으로 이루어지는 것을 확인 할 수 있으며, AD Disable 시점에 기존 제어 방식으로 변경하면 시스템이 불안정해지는 것을 시뮬레이션 결과로 확인 할 수 있다.

#### 4. 결론

주파수 영역 수동성 이론을 기반으로 해석한 것과 같이 인버터 출력 어드미턴스의 실수 값이 음수가 아닌 영역에서 동작을 하게 되면, 정상적으로 인버터가 동작하는 것을 확인할 수 있었으며, 계통 임피던스의 변화로 인해 어드미턴스의 실수 값이 음수인 영역에서 동작을 하게 되면 시스템이 불안정해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 계통 임피던스의 변화로 인해 기존 출력 어드미턴스의 실수 부분이 음수가 되는 조건에서도 제안하는 방식을 통해 음수가 되지 않도록 하여, 제어가 정상적으로 잘 동작하는 것을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업(24A01031)에 의하여 연구되었음.

#### 참고 문헌

[1] K.Alluhaybi, I.Batarseh, and H.Hu, "Comprehensive review and comparison of single-phase grid-tied photovoltaic micro inverters," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 8, no. 2, pp. 1310-1329, Jun. 2020.

[2] L. Harnefors, M. Bongiorno and S. Lundberg, "Input-Admittance Calculation and Shaping for

Controlled Voltage-Source Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp. 3323-3334, Dec. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.904022.

[3] J. Dannehl, F. W. Fuchs, S. Hansen and P. B. Thøgersen, "Investigation of Active Damping Approaches for PI-Based Current Control of Grid-Connected Pulse Width Modulation Converters With LCL Filters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 4, pp. 1509-1517, July-Aug. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049974.

[4] L. Harnefors, A. G. Yepes, A. Vidal and J. Doval-Gandoy, "Passivity-Based Controller Design of Grid-Connected VSCs for Prevention of Electrical Resonance Instability," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 2, pp. 702-710, Feb. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2336632.