

# LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 안정도 향상을 위한 수동댐핑 저항 선정

조종민, 신창훈, 차한주  
충남대학교

## Determination of Passive Damping Resistor for Stability Improvement of Grid-Connected Inverter using an LCL Filter

Jongmin Jo, Chang hoon Shin, Hanju Cha  
Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류 제어 안정도 향상을 위해 수동댐핑 기법을 적용하였으며, 안정도 해석기법을 기반으로 댐핑저항을 선정하였다. 전류제어기는 동기좌표계 PI 제어를 적용하였고, 인버터 15T<sub>s</sub> 시지연 특성을 고려한 전류제어 모델링을 수행하였다. 개루프 함수의 이득특성을 통해 필터공진을 0dB로 저감하는 최소 댐핑저항을 도출하였으며, 보드선도와 근궤적법을 기반으로 전류제어 안정도를 보장할 수 있는 적용 가능한 댐핑저항을 선정하였다. 댐핑저항을 적용한 7kW 인버터 시뮬레이션 및 실험을 통해 안정도 향상 및 댐핑저항 선정의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

전력산업의 기술 향상 및 확대 보급에 따라 전력산업의 패러다임이 변화하고 있으며, 신재생 에너지 및 배터리 기술 등을 접목시킨 마이크로그리드는 기존 계통 인프라의 개념을 바꿔가고 있다. 특히, 계통연계형 마이크로그리드에서는 친환경 에너지원으로부터 계통과의 전력 수송을 위해 인버터와 같은 전력전자 기술이 필수적이며, 고품질의 전력을 공급하기 위해 다양한 기술들이 연구되고 있다. 특히, 인버터 기술 중 하나로써 필터 체적 감소 및 스위칭 리플 저감 효과 향상을 위해 LCL 필터가 널리 적용되고 있으나, LCL 필터의 적용은 공진 문제로 인해 시스템의 불안정성을 야기할 수 있으므로 안정화 기술이 요구된다. 필터공진 문제를 해결하기 위해 제어 알고리즘을 변경하는 능동댐핑은 구현의 복잡성을 증가시킨다<sup>[1]</sup>. 공진을 저감하기 위한 가장 간단한 방법은 수동댐핑 기법 중에서 필터 커패시터에 직렬저항을 삽입하는 방식인데<sup>[2]</sup>, 전류제어의 안정도 향상을 위해 적용 가능한 댐핑저항 선정에 대한 해석 연구가 부족하다. 본 논문에서는 전류제어 안정도 향상을 위한 댐핑저항을 안정도 해석을 기반으로 선정하였으며, 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

### 2. 전류제어 안정도 향상을 위한 수동댐핑 저항 선정

#### 2.1 수동댐핑 기법을 적용한 계통연계형 인버터 구조

그림 1은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터에서 필터 커패시터에 직렬로 댐핑저항 R<sub>d</sub>를 삽입한 구조로써, 전류제어 불안정성을 야기하는 필터 공진을 저감하기 위해 수동댐핑 기법을 적용하였다. 표 1은 계통연계형 인버터 시스템의 파라

미터를 나타내며, 필터의 공진주파수는 1.41kHz이다.

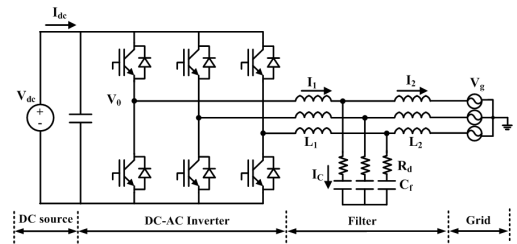


그림 1 수동댐핑 기법을 고려한 계통연계형 인버터 구조  
Fig. 1 Configuration of grid-connected inverter considering passive damping method

표 1 계통연계형 인버터의 시스템 파라미터  
Table 1 System parameters of grid-connected inverter

Parameter	Value
P	정격 용량 7kW
V	정격 전압 220V
L <sub>1</sub>	인버터 측 필터 인덕터 1.1mH
L <sub>2</sub>	계통 측 필터 인덕터 0.33mH
C <sub>f</sub>	필터 커패시터 50uF

#### 2.2 전류제어 안정도 향상을 위한 댐핑저항 선정

그림 2는 댐핑저항 R<sub>d</sub>를 고려한 I<sub>2</sub> 전류제어 블록도이다. 전류제어는 동기좌표계에서 수행되며 식 (1)의 PI 제어기를 적용하였고, 제어기 이득은 극점 배치 기법을 통해 선정하였다. 식 (2)는 인버터의 15T<sub>s</sub> 시지연 함수를 나타내며, 식 (3)은 댐핑저항 R<sub>d</sub>를 고려한 LCL 필터의 전달함수로써, 인버터 출력전압 V<sub>i</sub>에 대한 계통 측 전류 I<sub>2</sub>를 나타낸다. 댐핑저항 R<sub>d</sub>는 LCL 필터 전달함수를 구성하는 2차식의 분모 항에 1차 성분을 생성하므로 s 평면상의 허수축에 존재하는 공진 극점을 좌반면으로 이동시킴에 따라 댐핑의 역할을 수행할 수 있으며, 댐핑저항 R<sub>d</sub>값에 따라 공진극점의 위치는 달라진다.

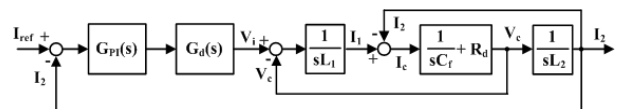


그림 2 수동댐핑 기법을 고려한 I<sub>2</sub> 전류제어 블록도  
Fig. 2 Block diagram of I<sub>2</sub> current control considering passive damping method

$$G_{PI}(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$

$$G_d(s) = e^{-s * 15T_s} \quad (2)$$

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{sL_1} \cdot \frac{sR_d C_f z_{res}^2 + z_{LC}^2}{s^2 + sR_d C_f \omega_{res}^2 + \omega_{res}^2} \quad (3)$$

$$z_{LC}^2 = \frac{1}{L_2 C_f} \quad \omega_{res}^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f} \quad (4)$$

그림 3의 파란색 실선은 LCL 필터만으로 구성된 전류제어 개루프 특성을 나타내며, 위상교차 주파수가 필터공진 주파수와 같으므로 큰 이득으로 인해 불안정하다. 따라서, 최소 댐핑저항 값을 가진 공진 주파수에서 개루프 이득이 0dB가 되는 조건으로 식 (5)와 같고, 계산된 최소 댐핑저항 값은 0.9Ω이다.

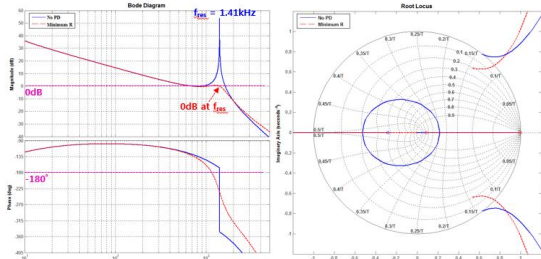
$$20 \log |G_{PI}(s) G_d(s) G_{LCL}(s)|_{s=j\omega_{res}} = 0dB \quad (5)$$

댐핑저항 설계방법은 지면의 제약으로 추후 논문지에서 자세히 정리하겠다. 최소저항 값을 가진 공진주파수 지점에서 개루프 함수의 이득을 0dB로 만들지만, 이득 및 위상여유를 확보할 수 없기 때문에 전류제어 안정도를 보장할 수 없다. 따라서, 위상교차 주파수인 공진주파수 지점에서 이득을 0dB보다 작은 값을 충족시키는 댐핑저항이 요구되며, 안정한 이득 및 위상여유 확보를 위해 공진주파수에서 개루프 이득이 4dB를 만족하는 1.7Ω을 선정하였으며, 이 때 기본파 발생 손실은 27.5W로써 매우 작다.

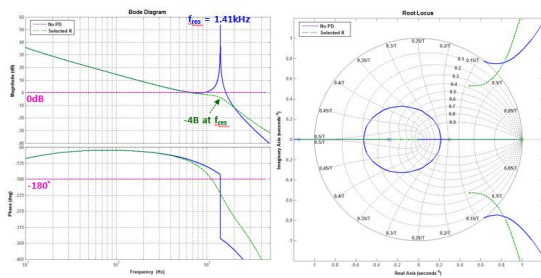
### 2.3 전류제어 안정도 해석

그림 3(a)의 빨간색 점선은 최소 댐핑저항 0.9Ω을 적용한 경우 전류제어 안정도 해석 결과이다. 보드선도를 이용한 주파수 응답특성에서 공진주파수의 이득을 0dB로 만들었으므로 필터공진을 저감하지만 이득여유는 0.296dB, 위상여유는 54.5°로써 불안정하며, 비례이득  $k_p$  가변에 따른 근궤적법을 이용한 이산시간 해석에서도 적용된  $k_p$ 에서 공진 극점이 단위원 밖에 존재하기 때문에 불안정한 전류제어가 수행된다.

그림 3(b)의 녹색 점선은 댐핑저항 1.7Ω을 적용한 경우 전류제어 안정도 해석결과이다. 보드선도 해석에서 공진주파수의 이득은 4dB로 수직과 동일하며, 2.1dB와 49.4°에 해당하는 이득 및 위상여유를 확보함에 따라 안정한 전류제어가 가능하며, 근궤적법 해석에서 적용된  $k_p$ 에서 모든 극점이 단위원 내에 존재하기 때문에 안정한 전류제어가 수행됨을 알 수 있다.



(a)  $R_d = 0.9\Omega$  적용 유무에 따른 안정도 해석



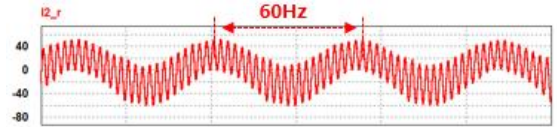
(b)  $R_d = 1.7\Omega$  적용 유무에 따른 안정도 해석

그림 3  $I_2$  전류제어 안정도 해석

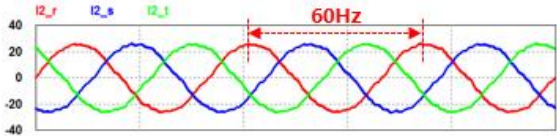
Fig. 3 Stability analysis of  $I_2$  current control

### 2.4 시뮬레이션 및 실험

그림 4와 5는 댐핑저항에 따른 시뮬레이션 결과 및 실험결과로  $I_2$  전류파형이다. 그림 4(a)와 그림 5(a)는 최소 댐핑저항  $R_d = 0.9\Omega$ 을 적용한 결과로써, 60Hz의 성분으로 전류제어가 수행되지만 고조파 성분의 왜곡으로 인해 해석과 동일하게 불안정한 전류제어가 수행된다. 그림 4(b)와 그림 5(b)는  $R_d = 1.7\Omega$ 을 적용한 결과로써 7kW, 220V의 전류 지령치  $18.37A_{rms}$ 에 맞게 3상 전류는  $18.3A_{rms}$ ,  $18.3A_{rms}$ ,  $18.4A_{rms}$  크기를 갖는 60Hz의 안정한 전류제어가 수행된다. 두 조건의 시뮬레이션 및 실험에서 안정도 해석과 동일한 결과를 도출하였다.



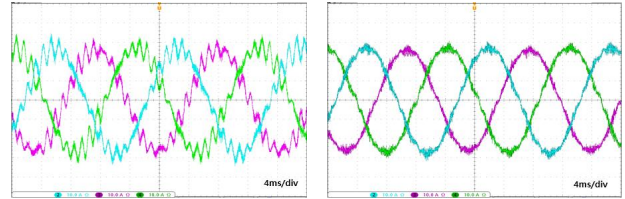
(a)  $R_d = 0.9\Omega$  적용 시,  $I_2$  전류제어



(b)  $R_d = 1.7\Omega$  적용 시,  $I_2$  전류제어

그림 4  $I_2$  전류제어 시뮬레이션

Fig. 4 Simulation of  $I_2$  current control



(a)  $R_d = 0.9\Omega$  적용

(b)  $R_d = 1.7\Omega$  적용

그림 5  $I_2$  전류제어 실험파형

Fig. 5 Experimental results of  $I_2$  current control

### 3. 결론

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어 안정도 향상을 위해 수동댐핑 기법을 적용하였다. 동기 좌표계 축에서 PI 제어기와  $1.5T_s$  시지연 특성을 고려한 전류제어 모델링을 수행하였다. 필터 공진이득을 0dB로 저감하는 최소 댐핑저항 값을 도출하였고, 보드선도와 근 궤적법을 이용하여 안정도를 보장하기 위해 실제 적용 가능한 댐핑저항을 선정하였다. 또한, 7kW 인버터 시뮬레이션 및 실험을 통해 전류제어 안정도 향상 및 댐핑저항 산정의 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] J. Dannehl, M. Liserre, and F. W. Fuchs, "Filter Based Active Damping of Voltage Source Converters With LCL Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3623-3633, Aug. 2011.
- [2] R. P. Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, R. Sebastian, J. Dannehl, and F. W. Fuchs, "Analysis of the Passive Damping Losses in LCL Filter Based Grid Converters," *IEEE Trans. Power Electronics.*, vol. 28, no. 6, pp. 2642-2646, Oct. 2012.