

# 병렬 연결된 계통연계 인버터용 수동 댐핑 회로 분석 및 설계

안효민, 성원용, 안정훈, 오창열, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Analysis and Design of Passive Damping Circuit for Parallel-Connected Grid-tie Inverters

Hyo Min Ahn, Won Yong Sung, Jung Hoon Ahn, Chang Yeol Oh, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 병렬 연결된 계통연계 인버터용 LCL 필터의 수동 댐핑 회로의 설계 및 분석을 진행한다. 인버터가 병렬 연결 되었을 경우, 순환전류로 인한 LCL 필터 및 수동 댐핑 회로의 특성이 변하게 된다. 기존의 수동 댐핑 회로에 대한 연구는 주로 단일 인버터 구성을 기준으로 진행되었기 때문에 병렬 연결된 인버터의 LCL 필터에 적용하기에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 병렬 연결된 수동 댐핑 회로를 포함한 LCL 필터의 특성을 분석하고 분석한 내용을 토대로 병렬 연결된 LCL 필터의 수동 댐핑 회로를 설계한다.

### 1. 서론

계통연계 인버터는 높은 품질의 출력 전류가 요구된다. 따라서 기존 연구에서는 출력 필터로 고조파 감쇄율이 상대적으로 높은 LCL 필터를 주로 사용한다.<sup>[1, 2]</sup> 그러나, LCL 필터의 경우 공진 주파수에서의 공진 피크가 크게 발생하게 된다. 따라서 이를 저감하기 위해 수동 댐핑 회로를 추가로 LCL 필터에 연결하여 사용한다.<sup>[1]</sup>

계통연계 인버터가 병렬로 연결 되었을 경우 계통의 임피던스 ( $L_g$ )로 인한 LCL 필터 간 순환전류가 발생한다. 이러한 순환전류는 수동 댐핑 회로를 포함한 LCL 필터의 주파수응답 특성에 변화를 야기한다. 그러나 기존 연구에서는 인버터 병렬연결에 따른 LCL 필터의 수동 댐핑 회로에 대한 특성 분석 및 설계에 대해 자세히 다루지 않았다.<sup>[1, 2]</sup> 따라서 병렬연결된 LCL 필터용 수동 댐핑 회로를 설계하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 인버터 병렬구성에 따른 LCL 필터의 수동 댐핑 회로를 분석 및 설계를 진행한다. 그리고 이를 시뮬레이션을 통해 검증 한다.

### 2. 병렬연결 인버터의 LCL 필터 설계 및 분석

#### 2.1 LCL 필터 특성 분석

그림 1은 3개의 인버터가 병렬 연결되었을 경우에 LCL 필터에서 발생하는 순환전류 파형이다. 이상적인 계통의 경우 계통 임피던스가 없기 때문에 순환전류 문제가 발생하지 않는다. 그러나 실제 계통은  $L_g$ 가 존재하기 때문에 LCL 필터간의 순환전류가 발생 하게 된다. 이 때문에 병렬 연결된 인버터의 LCL 필터 주파수 응답 특성이 변하게 된다.

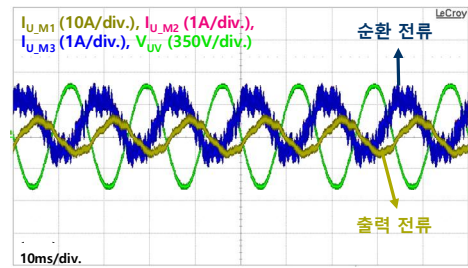


그림 1 병렬 연결된 인버터의 LCL 필터 순환전류  
 Fig. 1 Circulating currents of LCL filter of parallel connected grid-tie inverters

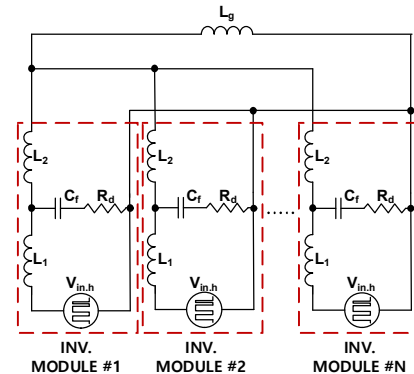


그림 2 병렬 연결된 인버터의 LCL 필터 고조파 단락 모델  
 Fig. 2 Short circuit model of parallel-connected inverters with LCL filters

그림 2는  $N$ 개가 병렬 연결된 인버터의 수동 댐핑 회로를 포함한 LCL 필터의 고조파 단락 회로 모델이다. LCL 필터의 임피던스는 모두 동일하다고 가정하며, 분석할 댐핑 회로는 필터 커패시터 ( $C_f$ ) 직렬연결 구조이다. 그림 2를 이용하여 계산한 인버터 병렬연결 개수 ( $N$ )에 따른 전달 함수 ( $G_g(s)$ ) 및 LCL 필터의 공진 주파수 ( $\omega_{r1}(N)$ ) 댐핑 저항을 포함한 LCL 필터의 공진 주파수 ( $\omega_{r2}(N)$ )는 수식 1, 2 그리고 3과 같다.<sup>[1]</sup>

$$G_g(s) = \frac{C_f R_d + 1}{\left[ C_f L_1 (L_2 + N L_g) s^3 + C_f R_d (L_1 + L_2 + N L_g) s^2 \right] + (L_1 + L_2 + L_g + (N-1) L_g) s} \quad (1)$$

$$\omega_{r1}(N) = \frac{L_1 L_2 L_g N}{L_1 (L_2 + N L_g) C_f} \quad (2)$$

$$\omega_{r,2}(N) = \sqrt{\frac{(L_1 + L_2 + NL_g)(4L_1(L_2 + NL_g))}{-C_f R_f^2(L_1 + L_2 + NL_g)}} \quad (3)$$

## 2.2 수동 댐핑 회로 설계

LCL 필터의 사양 및 파라미터는 표 1과 같고 그림 3은 병렬 구성 개수 ( $N$ )에 따른 LCL 필터 전달함수이다. 그림 3과 같이 인버터가 병렬연결 될 경우 LCL 필터의 공진 주파수가 좌측으로 이동하며 고조파 전류의 감쇄율이 감소한다.

표 1 LCL 필터 설계 파라미터 및 사양  
Table 1 Specifications and parameters of LCL filter

$L_1$	$L_2$	$C_f$	$L_g$
1.3 mH	0.3 mH	3.0 $\mu$ F	0.1 mH
$V_{DC-link}$	$V_{gid,LL}$	$f_s$	$P_{out,rate}$
650 V <sub>DC</sub>	380 V <sub>RMS</sub>	10 kHz	10 kW

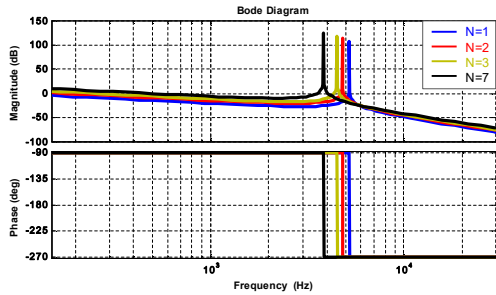


그림 3 N에 따른 LCL 필터 주파수 응답 특성  
Fig. 3 Frequency responses of LCL filter by N

기존 LCL 필터용 수동 댐핑 저항 ( $R_{d1}$ ) 설계방법은 수식 (1)에서 댐핑 저항으로 인해 추가되는 영점을 기준으로 하고 이는 수식 4와 같다. 수식 (4)와 (5)에서  $a$ 는 공진 주파수 대비 추가되는 영점의 위치를 나타낸다. 기존 설계 방법은  $N$ 에 따른 공진 주파수 변화를 고려하지 않았다. 그러므로  $N$ 에 따라 공진 주파수가 이동해도 추가되는 영점의 위치는 변화 하지 않는다. 이로 인해  $N$ 이 증가하면, 공진 주파수와 영점의 거리가 증가 하게 되고 이로 인해서 그림 4 (a)와 같이 공진 주파수에서의 공진 피크 감쇄율과 고조파 대역에서의 고조파 전류 감쇄율이 감소한다. 따라서 인버터 병렬연결에 따른 공진 주파수의 변화를 고려한 댐핑 저항 ( $R_{d2}(N)$ )을 설계 한다. 수식 (5)는  $N$ 의 변화에 따른 댐핑 저항의 설계 파라미터를 나타낸다. 그림 4 (b)에서 확인 할 수 있듯이, 제안된 방법을 사용할 경우 추가되는 영점과 공진 주파수와의 거리가 인버터 개수와 상관없이 항상 일정하다. 따라서  $N$ 이 증가 하더라도 댐핑 성능의 변화가 거의 없는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 5의 시뮬레이션 결과로도 확인 할 수 있듯이  $R_{d2}(N)$ 를 적용 하였을 때 인버터 증가에 따른 출력전류 품질의 변화가  $R_{d1}$ 을 적용 하였을 때 보다 작은 것을 확인 할 수 있다.

$$R_{d1} = \frac{1}{a\omega_{r,1}(1)C_f} \quad (4)$$

$$R_{d2}(N) = \frac{1}{a\omega_{r,1}(N)C_f} \quad (5)$$

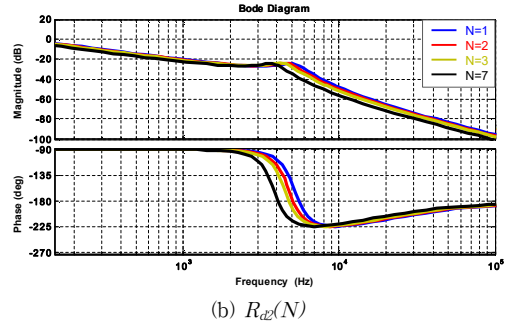
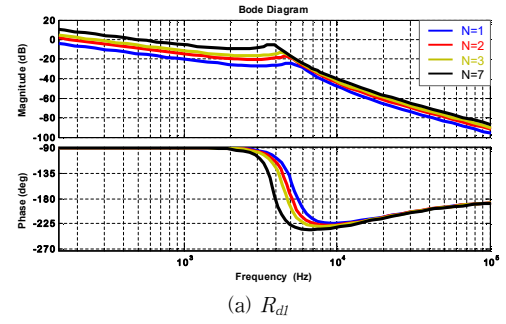


그림 4 N에 따른 수동 댐핑 회로를 포함한 LCL 주파수 응답 특성  
Fig. 4 Frequency responses of LCL filter with passive damping circuits by N

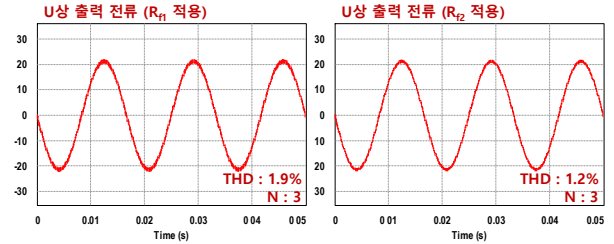


그림 5 인버터 출력 전류 (좌:  $R_{d1}$ , 우:  $R_{d2}(N)$ )  
Fig. 5 Output currents of grid-tie inverter (left:  $R_{d1}$ , right:  $R_{d2}(N)$ )

## 3. 결론

본 논문에서는 계통연계 인버터가 병렬연결 되었을 때, 수동 댐핑 회로를 포함한 LCL 필터의 특성 변화에 대해 분석 하였다. 그리고 분석한 내용을 토대로 댐핑 회로 설계를 진행 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 이를 검증 하였다.

## 참고 문헌

- [1] Weimin Wu, Yuanbin He and Tianhao Tang, "A New Design Method for the Passive Damped LCL and LLCL Filter Based Single Phase Grid Tied Inverter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 60, no. 10, pp. 4339 4350, October 2013.
- [2] Timothy CY Wang, Zhihong Ye, Gautam Sinha, and Xiaoming Yuan, "Output Filter Design for a Grid interconnected Three Phase Inverter," Power Electronics Specialist Conference (PESC Acapulco 2003), Acapulco (Mexico), June 2003.