

# LLCL 입력필터를 갖는 단상 그리드 컨버터의 전류제어 안정도 해석

배철주, 이동춘  
영남대학교

## Stability Analysis of Current Control for Single-Phase Grid Converters with LLCL Input Filters

Cheol Ju Bae and Dong Choon Lee  
Yeungnam University

### ABSTRACT

본 논문은 LLCL 입력필터를 적용한 단상 그리드 컨버터에서 필터의 공진 감쇠를 위한 가상저항 기반의 능동 감쇠 기법을 이용한 전류제어 시스템의 안정도를 분석한다. LLCL 필터의 가상저항 값에 따른 안정도를 조사하고 PSIM 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다.

### 1. 서론

신재생 에너지의 빠른 성장에 힘입어 계통 연계를 위한 그리드 컨버터가 널리 사용되고 있다. 계통 연계를 위해서는 PWM 스위칭에 의해 발생하는 출력 고조파를 일정 수준 이하로 유지하여야 하므로 컨버터와 계통 사이에 전력 필터가 사용된다. LLCL 필터는 LCL 필터에 비해 필터 사이즈를 저감할 수 있으며 스위칭에 의한 고조파 저감 특성이 우수하다는 장점으로 인해 최근 많은 연구가 진행되었다.

LLCL 필터에서 발생하는 공진은 기존 LCL 필터와 유사하게 수동 댐핑제어(Passive damping, PD)와 능동 댐핑제어(Active damping, AD)로 분류된다. 단상 LLCL 필터 시스템에서 능동 댐핑제어 방법 중 하나로 실제 저항 대신에 가상의 저항을 제어 알고리즘으로 구현하여 공진을 억제하는 가상저항 기법이 제안되었다.<sup>[1],[2]</sup> 안정된 시스템 운용을 보장하기 위해서는 LLCL 필터 파라미터에 의해 결정되는 공진 주파수의 대역에 따라 가상저항 값의 대역 또한 바뀌어야 한다. 그러나 LLCL 필터를 갖는 단상 그리드 컨버터 시스템에서 가상저항 기법에 대한 안정도가 분석된 바가 없다. 따라서 상기 기법에서 가상저항 값의 변화에 따른 안정도를 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 상기 시스템의 모델링을 통해 가상저항의 변화에 따른 안정도 해석 및 시뮬레이션을 통해 비교 분석하고자 한다.

## 2. 단상 그리드 컨버터 시스템

### 2.1 시스템 모델링

LLCL 입력필터가 연결된 단상 그리드 컨버터 시스템이 그림 1에 보인다.  $v_c$ ,  $e_a$ ,  $i_c$ ,  $i_g$ ,  $i_{cap}$ 는 각각 컨버터의 출력 전압과 계통측 전압, 컨버터측 전류, 계통측 전류, LLCL 필터의 커패시터에 흐르는 전류이다. LLCL 필터는 컨버터측 인덕터  $L_1$ , 계통측 인덕터  $L_2$ , 필터 커패시터  $C$ , 직렬 인덕터  $L_f$ 로 구성된다. LLCL 필터 전달함수는 식 (1), (2)로 나타낼 수 있고 각각 컨버터 출력전압에 대한 계통측 전류, 필터 커패시터 전류에 대한 관계식이다.

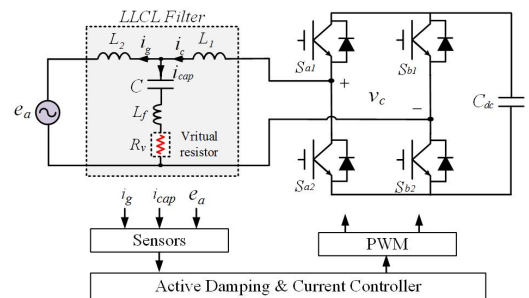


그림 1 LLCL 입력필터를 갖는 단상 그리드 컨버터 시스템

$$G_{v_c \rightarrow i_g}(s) = \frac{L_f C s^2 + 1}{(L_f C(L_1 + L_2) + L_1 L_2 C)s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (1)$$

$$G_{v_c \rightarrow i_{cap}}(s) = \frac{L_2 C s}{(L_f C(L_1 + L_2) + L_1 L_2 C)s^2 + (L_1 + L_2)} \quad (2)$$

### 2.1.1 능동 댐핑제어 및 전류제어

계통측 전류 제어를 위해 PI 제어기 대신 교류 신호에서 제어 성능이 비교적 유리한 PR 제어기를 채택한다. 식 (3)은 PR 제어기의 전달함수이고, 여기서  $K_p$ ,  $K_r$ ,  $\omega_o$ 는 각각 비례 이득, 공진 이득, 기본파 각주파수이다.

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (3)$$

그림 2(a)와 2(b)는 각각 실제 저항인 경우와 가상 저항인 경우 LLCL 필터의 블록도이다. 그림 2(b)와 같이 댐핑 항을 만들어 전류제어 입력으로 추가하게 되면 공진을 억제할 수 있다.

### 2.2 전류제어 안정도 해석

컨버터 모델과 LLCL 필터 파라미터를 표 1에 기입하였다. 그림 3은 가상저항 기법이 적용된 전체 전류제어 블록도를 보인다.  $G_{delay}(s)$ 는 한 주기 샘플 지연시간으로  $e^{-T_s s}$ 이다.

그림 4는 가상제어 기법 적용 및 미적용인 경우에 대해서 개루프(Open loop) 전달함수의 보드선도이다. 댐핑 제어를 적용하지 않은 경우 공진 주파수에서 매우 큰 이득과 함께 180° 상전위로 인해 시스템이 불안정하다. 그림 5는 가상저항 값에 따른 폐루프(Closed loop) 시스템의 근궤적을 보인다. 가상저항 값이 0인 경우 공진 극점이 단위원 외부에 위치해 불안정하며, 점점 증가할수록 단위원 내부로 진입하여 시스템이 안정하게 된다. 그러나 계속해서 증가할수록 다른 극점이 단위원을 벗어나므로 다시 불안정해진다. 이 경우 제어기의 이득을 낮추면 다시 단위원 안으로 들어오지만 제어 동특성이 저하된다.

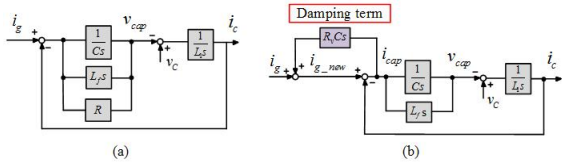


그림 2 LLCL 필터 블록도 (a)실제 저항, (b)가상 저항

표 1 시스템 파라미터

Converter	Value	LLCL Filters	Value
정격 전력 $P$	3 kW	컨버터측 L1	2 mH
계통 전압 $e_a$	220V / 60Hz	계통측 L2	0.4 mH
DC링크 전압 $V_{dc}$	340 V	커패시터 C	8 $\mu$ F
스위칭 주파수 $f_{sw}$	5 kHz	직렬 인덕터 Lf	32 $\mu$ H
샘플링 주기 $T_d$	100 $\mu$ s		

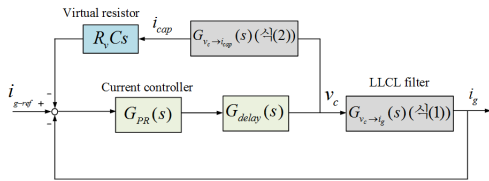


그림 3 가상저항 기법을 적용한 전류제어 블록도

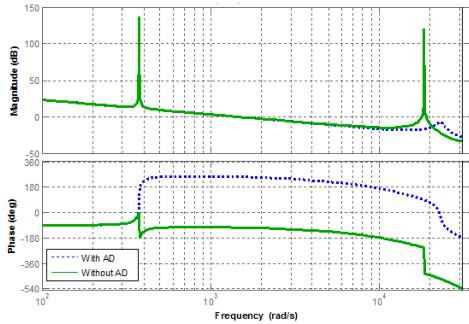


그림 4 개루프 전달함수의 보드 선도

### 2.3 시뮬레이션 결과

앞서 기술한 전류제어 안정도 분석을 바탕으로 표 1과 동일한 조건하에 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 가상저항 값이 0[ $\Omega$ ]일 때와 40[ $\Omega$ ]일 때의 계통측 전류와 FFT 결과이다. 능동 댐핑제어의 유무에 따른 공진 억제 특성을 나타낸다. 그림 7(a), (b)는 각각 가상저항 값이 10[ $\Omega$ ], 90[ $\Omega$ ]인 경우의 계통측 전류이다. 10[ $\Omega$ ]인 경우 공진이 완전히 제거되지 않았고 90[ $\Omega$ ]인 경우 전류제어가 되지 않음을 보인다.

### 3. 결론

본 논문은 LLCL 필터를 갖는 단상 그리드 컨버터 시스템에서 가상저항 기반의 능동 댐핑기법의 전류제어 안정도를 분석하였다. 가상저항 기법을 적용함으로써 공진이 완전히 제거되었으며 다양한 가상저항 값에 따라 전류제어 시스템의 안정도를 관찰하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문 또는 저서는 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF 2014R1A2A1A11052748)

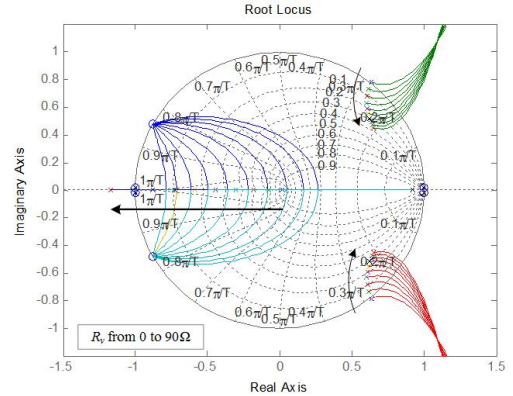


그림 5 가상저항 값에 따른 전류제어 시스템의 근궤적

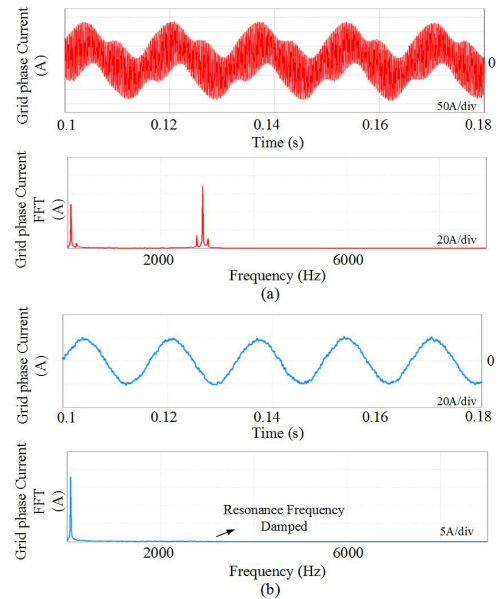


그림 6 계통측 전류와 FFT (a) Rv=0 $\Omega$ , (b) Rv=40 $\Omega$

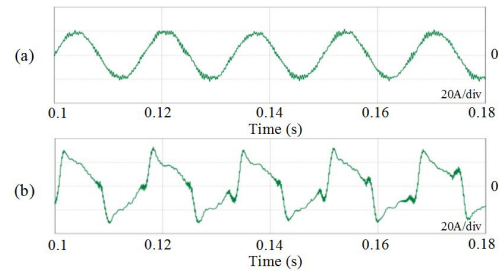


그림 7 계통측 전류 (a) Rv=10 $\Omega$ , (b) Rv=90 $\Omega$

### 참고 문헌

- [1] C. J. Bae, P. Alemi, and D. C. Lee, "Resonance Elimination of LLCL Filters Based on Virtual Resistor for Single Phase PWM Inverters," in *Proc. of ICPE*, Seoul (Korea), Jun. 2015.
- [2] Wessels, Christian, Jorg Dannehl, and Friedrich W. Fuchs. "Active damping of LCL filter resonance based on virtual resistor for PWM rectifiers Stability analysis with different filter parameters." in *Proc. of PESC*, Rhodes (Greece), Jun. 2008.