

# LLCL 입력필터를 갖는 단상 그리드 컨버터의 가상 저항에 따른 전류제어 안정도 해석

배철주<sup>1</sup>, 이동춘<sup>†</sup>

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

Cheol-Ju Bae<sup>1</sup> and Dong-Choon Lee<sup>†</sup>

### Abstract

To avoid the stability issues of LLCL filters, passive or active damping methods to eliminate the resonance phenomena are required. In this paper, system stability of a current control is analyzed when the active damping scheme based on the virtual resistor is utilized in single-phase grid converter systems with LLCL input filters. The control performance according to the parameters of the virtual resistance is investigated. The validity of stability analysis was verified by simulation and experimental results.

**Key words:** Active damping, Grid converter, LLCL filters, Stability, Virtual resistor.

### 1. 서 론

산업사회의 고도화로 인해 전력 수요가 증가함에 따라 최근 태양광, 풍력 등 신재생 에너지를 이용한 분산 전원 시스템이 크게 주목 받고 있다. 신재생 에너지의 급속한 성장에 따라 계통 연계를 위한 그리드 컨버터가 널리 사용되고 있다<sup>[1]</sup>.

계통 연계를 위해서는 PWM 스위칭에 의해 발생하는 출력 고조파를 일정 수준 이하로 유지하여야 하므로 일반적으로 컨버터와 계통 사이에 전력 필터가 사용된다. 흔히 사용되는 L 필터는 단순하고 제어가 간단하지만 충분한 고조파 저감을 위해서 큰 용량의 인덕터가 필요하여 비용 및 전류제어 동특성 면에서 불리하다. LCL 구조의 필터는 인덕터 사이즈를 줄이고 전류제어 동특성을 향상시킬 수 있으나 계통 전류에 공진 현상이 발생할 가능성이 있다.

한편, 최근 개발된 LLCL 필터는 LCL 필터에 작은 인덕터를 추가하여 스위칭 주파수의 고조파 저감 특

성이 우수하다<sup>[2]-[3]</sup>. 또한 LLCL 필터는 LCL 필터의 커패시터에 직렬로 작은 인덕터를 추가함으로써 계통측 인덕터를 크게 줄일 수 있어 전체적으로 LCL 필터보다 작게 설계할 수 있다<sup>[4],[5]</sup>. 뿐만 아니라 LLCL 필터는 전력손실 면에도 LCL 필터보다 유리하여 최근 많은 주목을 받고 있다<sup>[4]</sup>.

그러나 LLCL 필터도 LCL 필터에서와 마찬가지로 공진 현상이 발생할 수 있다. 공진을 억제하는 기법은 크게 수동댐핑 제어(Passive damping, PD)와 능동댐핑 제어(Active damping, AD)로 분류할 수 있다. 수동댐핑 제어는 필터 커패시터에 직렬로 저항 소자를 삽입하여 공진을 제거하는 방법으로 간단하고 신뢰성이 높다<sup>[6],[7]</sup>. 그러나, 추가 비용 및 전력 손실이 발생하는 문제가 있다. 이에 비해 능동댐핑 제어는 제어 알고리즘의 추가에 의해 공진을 억제할 수 있으므로 수동댐핑 기법의 문제점을 해결할 수 있으나 제어 알고리즘이 복잡하다는 단점이 있다<sup>[5],[8]-[14]</sup>.

PR (Proportional and Resonant) 제어기 기반의 능동댐핑제어 기법<sup>[8],[9]</sup>은 대역통과필터(Band-pass filter)를 이용하여 계통측 전류에서 공진 성분을 추출한 뒤, PR 제어기를 이용하여 공진 현상을 제거하는 방식이다. 그러나 계통의 임피던스 변동으로 인해 공진 주파수가 변할 경우 실시간으로 이를 추정하여 필터의 대역폭을 수정해야 하는 번거로움이 있다. 그리고 노치 필터를 이용한 방법<sup>[10]</sup>과 진상-지상 보상기를 이용한 방법<sup>[11]</sup>이 제안

Paper number: TKPE-2016-21-5-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: [dclee@yu.ac.kr](mailto:dclee@yu.ac.kr)

Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

Tel: +82-53-810-2582 Fax: +82-53-810-4767

<sup>1</sup> Electric Equip. Develop. Team, Hyundai-rotam Comp.  
Manuscript received Jun. 7, 2016; revised Jul. 3, 2016;  
accepted Aug. 16, 2016

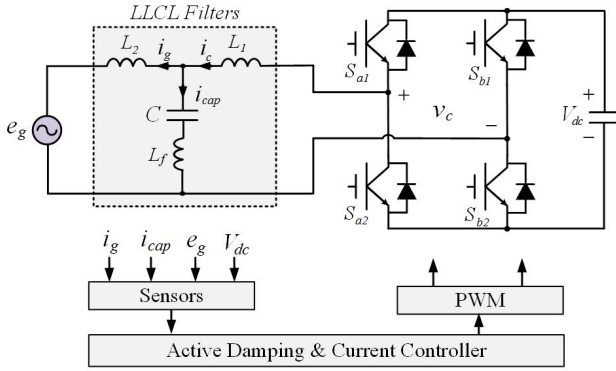


Fig. 1. Single-phase grid converters with LLCL filters.

된 바 있다. 이 방법들은 제어 알고리즘이 복잡하며 비교적 정확한 공진주파수 대역을 알아야 하므로 구현이 어렵다. 그 외에도 LLCL 필터의 LC 루프의 전압이나 전류를 이용한 방법이 제안된 바 있다<sup>[12]</sup>.

한편, 실제 저항을 사용하는 대신 시스템 전달함수에 가상의 저항성분이 삽입되는 알고리즘을 추가하여 실제의 저항과 유사한 효과를 보이는 가상저항 기법이 제안된 바 있다<sup>[5],[13],[14]</sup>. 이 방법은 필터 커패시터 전류의 피드백과 가상저항을 통해 댐핑 항을 구성하여 전류제어 입력으로 추가하므로 전류제어 안정도에 대한 신뢰성이 보장되어야 한다. 안정된 시스템 운용을 보장하기 위해서는 LLCL 필터 파라미터에 의해 결정되는 공진 주파수의 대역에 따라 가상 저항 값의 대역 또한 바뀌어야 한다.

LCL 필터의 경우 가상저항 기법의 제어 안정도 분석은 이미 수행된 바 있으나<sup>[13]</sup> LLCL 필터를 갖는 단상 시스템의 경우는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 LLCL 입력필터를 갖는 단상 그리드 컨버터 시스템에 대해 가상저항의 변화에 따른 제어 안정도를 분석하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 효과를 검증한다.

## 2. 단상 그리드 컨버터 시스템 모델링

그림 1은 LLCL 입력필터가 연결된 단상 그리드 컨버터 시스템을 나타낸다. 계통은 임피던스가 없는 이상적인 정현파 전압원으로 가정하고 컨버터와 계통간에는 LLCL 필터가 연결된다.  $V_{dc}$ ,  $v_c$ ,  $e_g$ ,  $i_c$ ,  $i_g$ ,  $i_{cap}$ 는 각각 직류단 전압, 컨버터 출력전압과 계통측 전압, 컨버터측 전류, 계통측 전류, 필터 커패시터에 흐르는 전류를 나타낸다.

그림 2(a)는 LLCL 필터에 대한 등가회로를 나타낸다. LLCL 필터는 컨버터측 인덕터  $L_1$ , 계통측 인덕터  $L_2$ , 필터 커패시터  $C$ , 직렬 인덕터  $L_f$ 로 구성된다. LLCL 필터의 전달함수는 식 (1), (2)로 나타낼 수 있고 각각 컨버터 출력전압에 대한 계통측 전류, 필터 커패시터 전류에 대한 관계를 나타낸다<sup>[2]</sup>.

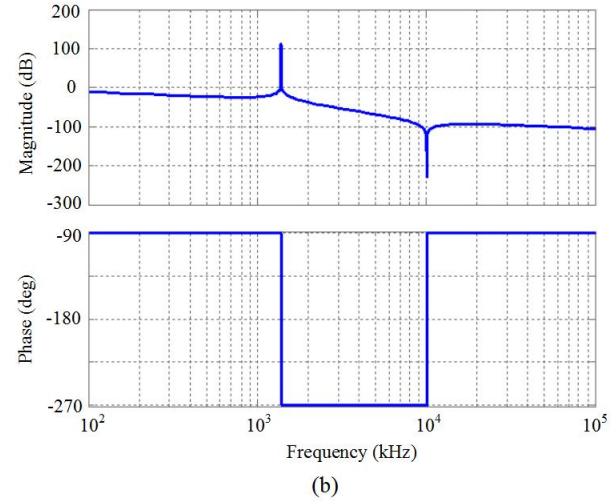
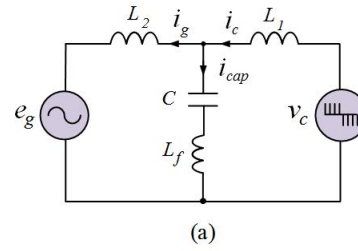


Fig. 2. Single-phase LLCL filters. (a) Equivalent circuit. (b) Bode plot.

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

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

필터의 공진 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C + (L_1 + L_2) L_f C}} \quad (3)$$

그림 2(b)는 LLCL 필터의 컨버터 출력전압에 대한 계통측 전류(식 (1))의 주파수 응답을 나타낸다. LLCL 필터의 주파수 응답은 두 종류의 공진 현상을 나타낸다. 첫째, 공진 주파수에서 매우 큰 이득과 함께  $180^\circ$  상전이가 발생하는 것으로 이로 인한 공진 현상은 시스템의 불안정을 야기할 수 있다. 둘째, 특정 주파수에서 매우 낮은 임피던스를 보이는 2차 공진 현상이 있는데, 이는 해당 주파수 대역의 성분은 모두 필터 커패시터 루프로 바이패스(bypass)되어 계통측 전류에는 나타나지 않음을 의미한다. 따라서 적절한 필터 파라미터의 설계를 통해 해당 주파수를 스위칭 주파수 대역으로 설정한다면 계통측 전류에는 컨버터의 PWM에 의한 스위칭 리플 성분이 나타나지 않는다.

### 3. 전류제어 및 능동댐핑 제어

#### 3.1 전류제어

컨버터의 기본과 전류 제어를 위해 비례-적분(PI) 제어기 대신 교류 신호에서 제어 성능이 우수한 비례-공진(PR) 제어기를 채택한다. 식 (4)는 PR 제어기의 전달 함수이고, 여기서  $K_p$ ,  $K_r$ ,  $\omega_o$ 는 각각 비례 이득, 공진 이득, 기본과 각주파수이다<sup>[8]</sup>.

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (4)$$

#### 3.2 능동댐핑 제어

본 연구에서는 가상저항을 이용하여 LLCL 필터에 의해 발생하는 공진 현상을 제거하고자 한다. 그림 3(a), (b)는 각각 필터 커패시터에 직렬로 실제 저항을 삽입한 경우(수동댐핑 제어)와 가상저항 기반의 능동댐핑 제어를 적용한 경우의 블럭도를 나타낸다<sup>[15]</sup>. 그림 3(b)와 같이 실제 저항 대신 가상 저항을 이용한 댐핑 항을 구성하여 전류제어기의 기준입력으로 추가하면 식 (5)와 같이 수동댐핑 제어의 경우와 동일한 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{i_c(s)}{i_g(s)} = \frac{L_f C s^2 + R C s + 1}{(L_f + L_1) C s^2 + R C s + 1} \quad (5)$$

따라서, 식 (6)과 같이 전류제어 지령에 댐핑 항을 추가하면 실제 저항으로 인한 추가 비용 및 전력 손실 없이 공진 현상을 제거할 수 있다.

$$i_{g\_new}^* = i_g^* + R_v C s i_{cap} \quad (6)$$

상기 방법에 사용되는 가상저항은 이상적으로 공진 성분을 제거하도록 설계되어야 한다. 그러나 필터 커패시터 전류  $i_{cap}$ 에는 공진 성분뿐만 아니라 기본과 및 스위칭 리플 성분이 포함된다. 특히,  $i_{cap}$ 에 포함된 기본과 성분은 PWM 변조지수의 포화나 과변조와 같은 문제를 발생시킬 수 있다<sup>[16]</sup>. 따라서 고역통과필터(High-pass filter, HPF)를 사용하여 기본과 성분을 제거할 필요가 있다.

한편 5 kHz의 스위칭 주파수에서 유니폴라(Unipolar) PWM을 사용할 경우 유효 스위칭 주파수는 10 kHz이므로 스위칭 리플 성분은 10 kHz 주파수를 갖는다. 이때 샘플링 주파수가 10 kHz이므로 측정된  $i_{cap}$ 에는 스위칭 리플이 나타나지 않으며 직류 오프셋이 나타날 수 있다. 따라서, HPF의 적용으로  $i_{cap}$ 에 포함된 기본과 및 스위칭 리플 또는 오프셋 성분이 모두 제거될 수 있다.

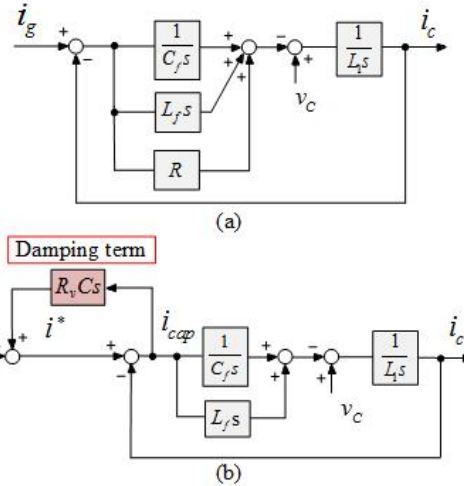


Fig. 3. Control block diagram of LLCL filters. (a) With actual resistor. (b) With virtual resistor in series with capacitor.

TABLE I  
SYSTEM PARAMETERS

Converter	Value	LLCL Filters	Value
Grid voltage $e_a$	220 V / 60 Hz	Converter-side inductor $L_1$	3 mH
DC-link Voltage $V_{dc}$	340 V	Grid-side inductor $L_2$	2.4 mH
Switching frequency $f_{sw}$	5 kHz	Filter capacitor $C$	10 $\mu$ F
Sampling period $T_d$	100 $\mu$ s	Series inductor $L_f$	25 $\mu$ H

### 4. 전류제어 안정도 해석

안정도 해석을 위해 사용된 컨버터 모델과 LLCL 필터 파라미터를 표 1에 나타내었다. 그림 4는 가상저항 기법이 적용된 전체 전류제어 블럭도를 보인다. 적절한 제어 동특성 및 안정도를 위해 PR 전류제어기의 대역폭을 300 Hz로 선정하였고, 이 때의 이득 값은  $K_p = 10.18$ ,  $K_r = 196$ 이다. 실제 디지털 제어로 동작되는 컨버터 시스템에는 디지털 프로세서의 연산 및 PWM으로 인한 샘플 지연시간을 갖는다. 그림 4에서  $G_{delay}(s)$ 는 이를 고려한 한 주기 샘플 지연시간을 나타내며  $e^{-T_s s}$ 로 표현된다<sup>[10]</sup>.  $G_{HPF}(s)$ 는 2차 고역통과필터의 전달함수로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{HPF}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \quad (7)$$

여기서, 감쇠비  $\zeta$  및 차단 각주파수  $\omega_c$ 는 각각 0.707, 1885 rad/s (300 Hz)이다.

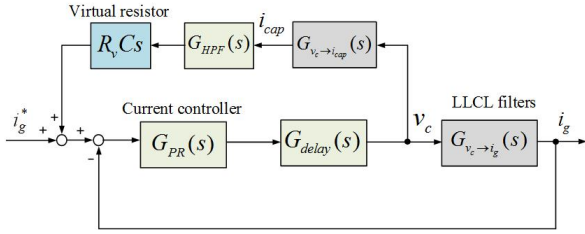


Fig. 4. Current control block diagram based on the virtual resistor method.

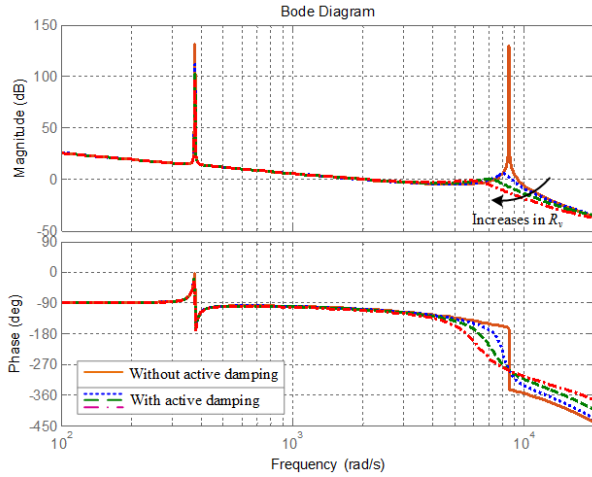


Fig. 5. Bode plot of the open-loop transfer function in Fig. 4.

그림 4의 제어 블록도에서 내부루프에 대한 전달함수와 전체 시스템의 개루프 전달함수는 각각 다음 식 (8), (9)으로 나타낼 수 있다.

$$G_{inner}(s) = \frac{G_{PR}(s)G_{delay}(s)}{1 - G_{PR}(s)G_{delay}(s)G_{v_c \rightarrow i_{cap}}(s)G_{R_v}(s)} \quad (8)$$

$$G_{open}(s) = G_{inner}(s)G_{v_c \rightarrow i_g}(s) \quad (9)$$

그림 5는 위의 식 (9)의 개루프 전달함수에서 가상저항 값에 따른 주파수 응답 특성을 보인다. 가상저항이 0 Ω으로 댐핑 제어를 적용하지 않은 경우 공진 주파수에서 매우 큰 이득과  $-180^\circ$  상전이로 시스템이 불안정하지만 능동 댐핑 제어를 적용할 경우 필터의 공진 현상이 제거되고 시스템이 안정함을 알 수 있다.

그림 6은 가상저항 값이 0Ω에서 30Ω까지 5Ω 간격으로 변화할 때 폐루프 시스템의 근궤적을 나타낸다. 가상저항 값이 0Ω인 경우, 공진 극점이 단위원 외부에 위치해 시스템이 불안정하며, 가상저항이 증가할수록 단위원 내부로 진입하여 시스템이 안정하게 된다. 그러나 계속해서 증가하면 다른 극점이 단위원을 벗어나므로 전류제어가 다시 불안정해진다. 이 경우 전류제어기의 이득을 낮추면 다시 단위원 안으로 들어올 수 있으나 제어의 동특성이 저하된다.

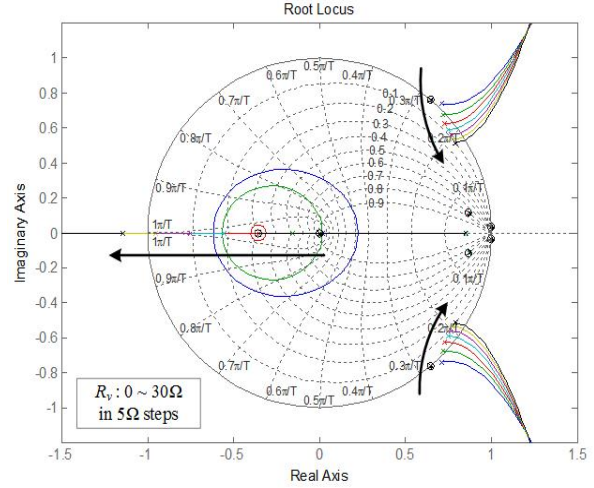


Fig. 6. Root locus of the closed-loop transfer function in Fig. 4.

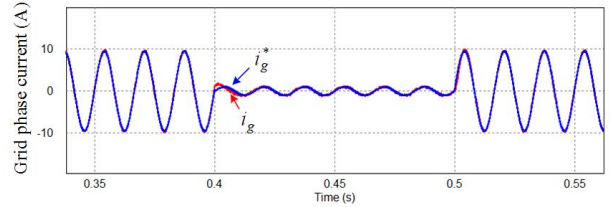


Fig. 7. Performance of grid current control.

## 5. 시뮬레이션

앞서 기술한 전류제어 안정도 분석을 바탕으로 동일 한 조건하에 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 가상저항 기법이 적용된 경우의 전류제어 동특성을 보인다. 10%~90% 부하 변동으로 인한 전류 지령의 변화에도 제어 전류는 잘 추종됨을 나타낸다.

그림 8은 가상저항 값이 다른 경우에 계통측 전류와 FFT 결과를 보인다. 그림 8(a)는 가상저항 값이 0Ω으로 능동댐핑 제어가 적용되지 않은 경우이다. 필터에 1.36 kHz 대역의 공진 현상이 발생하여 시스템이 불안정함을 알 수 있다. 그림 8(b)는 가상저항 값이 5Ω인 경우로 능동댐핑 제어가 적용되었으나 1.16 kHz 부근에서 1.63 A의 공진 전류가 충분히 제거되지 않았음을 보인다. 반면, 15Ω이 적용된 그림 8(c)의 경우는 공진 현상이 잘 제거되었음을 알 수 있다. 그림 8(d)는 가상저항 값이 30Ω인 경우로 계통측 전류에 공진 현상이 발생하지는 않지만 3차, 5차, 7차 등의 저차 고조파가 나타나 파형이 왜곡되며 전류제어가 잘 되지 않음을 보인다.

## 6. 실험

본 논문에서 분석한 가상저항의 효과를 검증하기

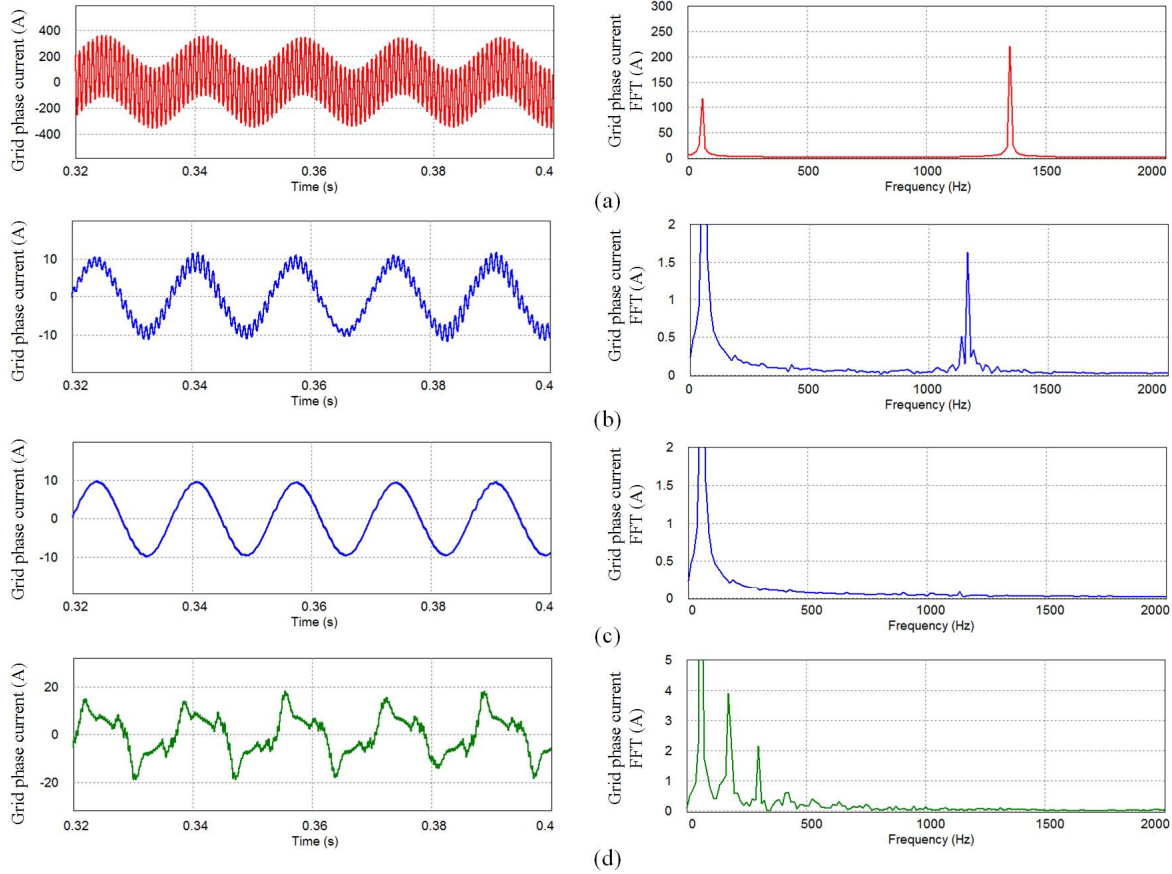


Fig. 8. Grid phase current and FFT spectra. (a)  $R_v=0\Omega$ . (b)  $R_v=5\Omega$ . (c)  $R_v=15\Omega$ . (d)  $R_v=30\Omega$ .

단상 컨버터 시스템에 대한 실험을 수행하였다. 그림 9는 LLCL 입력필터를 갖는 단상 그리드 컨버터와 제어 보드를 보인다. TMS320F28335 DSP 칩이 탑재된 제어 보드를 이용하여 제어 시스템을 구성하고 Semikron사의 IGBT(SKM75GB12T4) 모듈을 사용하여 단상 컨버터를 구성하였다. 사용된 직류단 평활용 커패시터는  $2,350\ \mu\text{F}$ 이며,  $5\text{kHz}$ 의 유니폴라 PWM을 사용하여 유효 스위칭주파수는  $10\ \text{kHz}$ 이며 데드타임은  $4\ \mu\text{s}$ 으로 설정하였다. 그 외 파라미터는 시뮬레이션 조건 및 표 1과 동일하다.

그림 10은 가상저항 값에 따른 계통측 전류 및 FFT 결과를 나타낸다. 그림 10(a)에서는 가상저항 값이  $0\Omega$ 으로 댐핑제어가 적용되지 않아  $1.13\ \text{kHz}$  대역에서  $1.77\ \text{A}$ 의 공진전류가 나타났다. 공진 전류 크기가 예상보다 작은 이유는 필터의 내부 저항에 기인한 댐핑이 작용한 것으로 분석된다. 그림 10(b)는  $5\Omega$ 의 가상저항을 적용한 경우로  $0.32\ \text{A}$ 의 공진전류 성분이 남아 있음을 보인다. 그림 10(c)는  $15\Omega$ 의 가상저항을 적용한 경우로 공진이 완전히 제거됨을 보인다. 그림 10(d)는  $30\Omega$ 의 큰 가상저항을 적용한 경우로 공진 현상은 제거되었으나 전류제어가 제대로 수행되지 않아 계통측 전류가 많이 왜곡됨을 보인다.

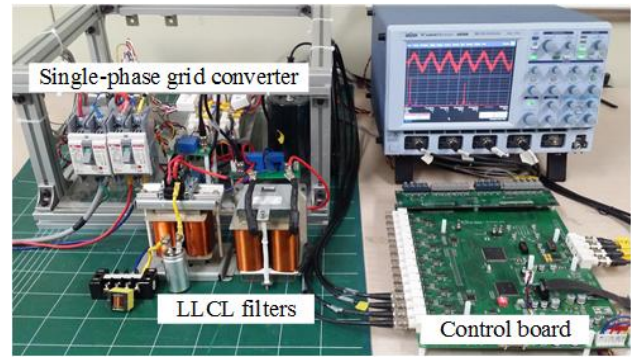


Fig. 9. Experimental set-up.

### 7. 결 론

본 논문은 LLCL 필터를 갖는 단상 그리드 컨버터 시스템에서 가상저항 기반의 능동 댐핑기법의 전류제어 안정도를 고찰하였다. 가상저항은 필터에 의해 발생하는 공진을 억제하기 위한 것으로 가상저항 값에 따라 나타나는 전류제어의 특성을 관찰하였다. 가상저항 값이 작을 경우 공진 억제 성능이 만족스럽지 않고 반대로 클 경우 전류제어 성능이 악화된다. 적절한 가상저항 값을 선택함으로써 공진을 완전히 제거하면서도

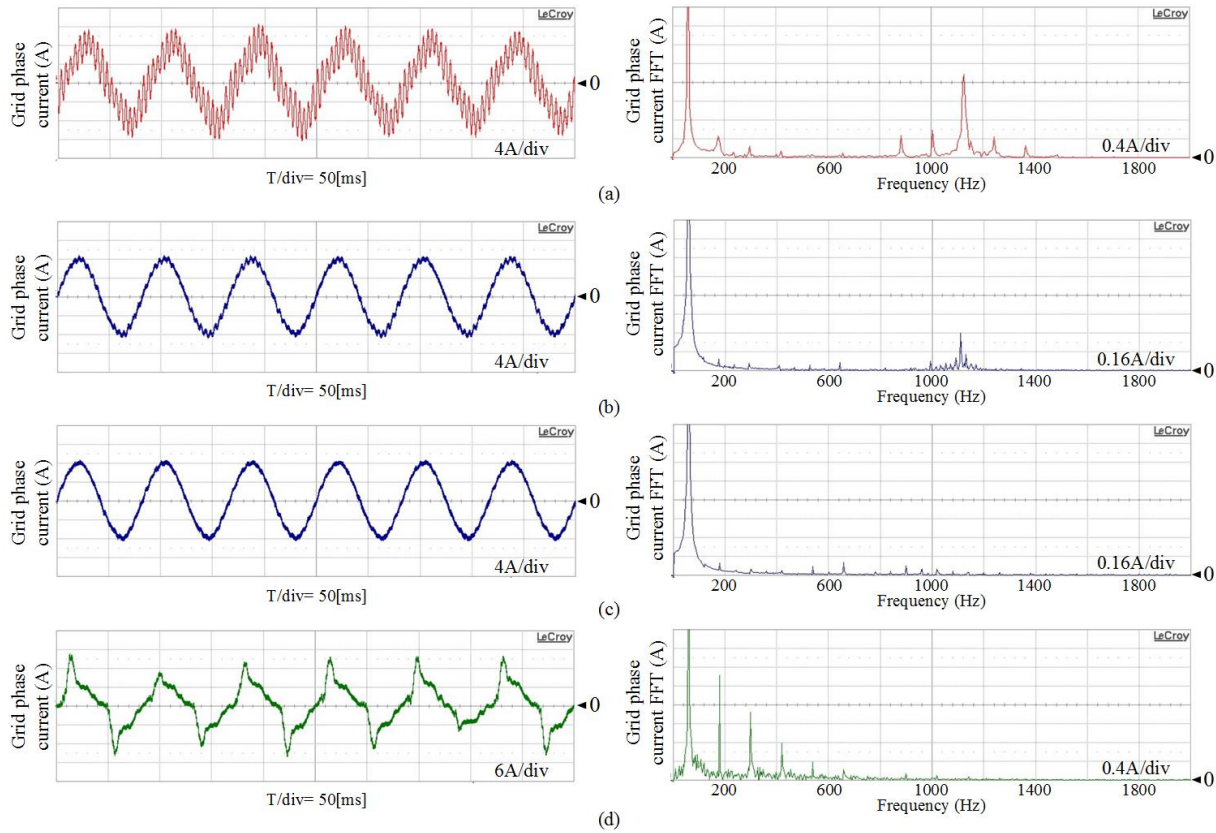


Fig. 10. (Experiment) Grid phase current and FFT spectra. (a)  $R_v=0\Omega$ . (b)  $R_v=5\Omega$ . (c)  $R_v=15\Omega$ . (d)  $R_v=30\Omega$ .

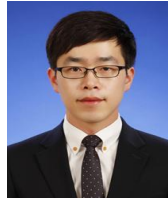
안정된 전류제어가 가능함을 확인하였다. 제시된 시스템 안정도 해석을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구과제 결과입니다. (NRF-2014R1A2A1A11052748)

## References

- [1] A. Lidozzi, G. L. Calzo, L. Solero, and F. Crescimbeni, "Single-phase inverter for grid-connected and intentional islanding operations in electric utility systems," *Journal of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 704-716, Mar. 2016.
- [2] W. Wu and F. Blaabjerg, "An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 27, No. 2, pp. 782-789, Feb. 2012.
- [3] M. Huang, X. Wang, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "LLCL-filtered grid converters with improved stability and robustness," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 5, pp. 3958-3967, May 2016.
- [4] W. Wu, M. Huang, and F. Blaabjerg, "Efficiency comparison between the LLCL- and LCL-filters based single-phase grid-tied inverters," *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 63-79, May 2014.
- [5] A. Payam, "Analysis and control of grid-connected three-level T-type converters," Ph. D. thesis, Dept. Electric. Eng., Yeungnam Univ., Korea, Feb. 2015.
- [6] 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. on Power Electron.*, Vol. 28, No. 6, pp. 2642-2646, June 2013.
- [7] K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation," in *Proc. of Compat. Power Electron.*, pp. 1-9, May/June. 2007.
- [8] P. Alemi, C. J. Bae, and D. C. Lee, "Resonance suppression based on PR control for single-phase grid-connected inverters with LLCL filters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 459-567, Jun. 2016.
- [9] P. Alemi, S. Y. Jeong, and D. C. Lee, "Active damping of LLCL filters using PR control for grid-connected three-level T-Type converters," *Journal of Power Electronics*, Vol. 15, No. 3, pp. 786-795, May 2015.
- [10] M. Huang, X. Wang, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "Stability analysis and active damping for LLCL based grid connected inverters," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 4, No. 3, pp. 187-195, May 2015.

- [11] C. Bao, X. Ruan, X. Wang, W. Li, D. Pan, and K. Weng, "Step-by-step controller design for LCL-type grid connected inverter with capacitor current feedback active damping," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 29, No. 3, pp. 1239-1253, Mar. 2014.
- [12] M. Huang, X. Wang, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "Active damping of LLCL-filter resonance based on LC-trap voltage or current feedback," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 3, pp. 2337-2346, Mar. 2016.
- [13] C. Wessels, J. Dannehl, and F. W. Fuchs, "Active damping of LCL filter resonance based on virtual resistor for PWM rectifiers-stability analysis with different filter parameters," in *Proc. of IEEE PESC*, pp. 3532 - 3538, Jun., 2008.
- [14] 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*, Jun. 2015, pp. 2875 - 2880.
- [15] C. J. Bae and D. C. Lee, "Stability analysis of current control for single-phase grid converters with LLCL input filters," 2015 *Power Electronics Annual Conference*, pp. 514-515, Jul. 2015.
- [16] J. C. Wiseman and B. Wu, "Active damping control of a high-power PWM current-source rectifier for line-current THD reduction," *IEEE Trans. on Industry Electron.*, Vol. 52, No. 3, pp. 758-764, Jun. 2005.



### **배철주(裴哲柱)**

1988년 8월 15일생. 2014년 영남대 전기공학과 졸업. 2016년 영남대 전기공학과 석사 졸업. 현재 현대로템(주) 연구원.



### **이동춘(李東椿)**

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ. 방문연구교수. 2004년 미국 Univ. of Wisconsin 방문연구교수. 2012년 미국 NCSU 방문연구교수, 현재 영남대 전기공학과 교수. 당 학회 JPE Editor-in-Chief.