

# 인덕터 내부저항을 고려한 LCL 필터의 능동댐핑 특성

김용중<sup>1</sup>, 김효성<sup>†</sup>

## Active Damping Characteristics on Virtual Series Resistances of LCL Filter for Three-phase Grid-connected Inverter

Yong-Jung Kim<sup>1</sup> and Hyosung Kim<sup>†</sup>

### Abstract

LCL filters are widely used in high-order harmonics attenuation of output currents in grid-connected inverters. However, output currents of grid-connected inverters with LCL filters can become unstable because of the resonance of the filters. Given that the characteristics of output currents in inverters mostly depend on filter performance, the exact analysis of filters by considering parasitic components is necessary for both harmonics attenuation and current control. LCL filters have three or four parasitic components: the series and/or parallel resistance of the filter capacitor and the series resistance of the two filter inductors. Most studies on LCL filters have focused on the parasitic components of the filter capacitor. Although several studies have addressed the parasitic components of the filter inductor at the inverter side, no study has yet investigated the concurrent effects of series resistance in both filter inductors in detail. This paper analyzes LCL filters by considering series resistance in both filter inductors; it proposes an active damping method based on the virtual series resistance of LCL filters. The performance of the proposed active damping is then verified through both simulation and experiment using Hardware-in-the-Loop Simulator(HILS).

**Key words:** Grid-connected inverter, LCL filter, Active damping, Series resistance of filter inductor.

### 1. 서 론

신재생에너지를 이용한 분산발전은 날씨에 영향을 받아 시간적으로 매우 심하게 변동하며 이러한 전력을 교류계통에 그대로 주입하게 되면, 계통의 안정성에 심각한 문제를 초래할 수 있다<sup>[1]</sup>. 또한 계통연계형 인버터에 의해 계통으로 주입되는 전류에는 인버터의 PWM 스위칭에 따른 높은 주파수의 고조파가 포함된다. 주입전류의 품질은 계통망의 전력품질에 영향을 미치므로 계통의 안정성과 품질을 확보하기 위해 주

입전류에 대한 제한규정이 강화되고 있다<sup>[2]</sup>.

필터는 인버터의 PWM 스위칭에 따른 주입전류의 고조파를 저감하기 위한 필수요소이다. 일반적으로 인버터 주입전류의 고조파 저감을 위한 필터는 L 필터와 LCL 필터가 사용된다. L 필터는 설계가 간단하고 시스템이 안정적인 장점이 있는 반면, 무게 및 부피가 크고 비용이 높아 경제적이지 못하며 충분한 감쇠력을 확보하기 위해서 필터 인덕턴스가 증가함으로 인해 출력전류의 동특성이 저하되는 단점을 갖는다. LCL 필터는 L 필터에 비해 작은 인덕턴스 값으로도 높은 감쇠비를 갖으며, 출력전류의 동특성이 L 필터에 비해 빠르고 경제적인 장점을 갖는다. 하지만 LCL 필터는 L 필터에서 존재하지 않은 공진현상이 발생하여 시스템의 안정성을 저하시키고 인버터 주입전류의 THD를 악화시키는 요인으로 해석된다<sup>[3]</sup>. 이와 같이 계통연계형 인버터의 출력전류 특성은 필터의 특성과 매우 밀접한 관련이 있으며, 정확한 주입전류 특성을 파악하기 위해서는 기생성분을 고려한 필터해석이 필수적이다<sup>[4]</sup>.

기존의 기생성분을 고려한 LCL 필터해석에서는 주로 필터커패시터 직렬저항성분과 필터커패시터 병렬저항성

Paper number: TKPE-2016-21-1-12

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

<sup>†</sup> Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University  
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

<sup>1</sup> Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Oct. 21, 2015; revised Nov. 2, 2015; accepted Dec. 28, 2015

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

분을 고려한 LCL 필터해석연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 필터커패시터 기생저항성분에 따른 LCL 필터모델링이 수립되어 필터커패시터 기생성분에 대한 LCL 필터특성해석이 가능해졌다<sup>[5][6]</sup>. 필터인덕터의 경우, 두 필터인덕터의 직렬저항성분을 모두 고려한 LCL 필터모델링이 수립되어있지 않아 명확한 LCL 필터의 특성해석에 어려움이 있다<sup>[7]</sup>.

LCL 필터의 기생성분에 대한 해석은 인버터 출력전류의 특성파악을 위해 필요하기도 하지만, LCL 필터의 공진억제를 위한 수동댐핑 및 능동댐핑 설계에 적용될 수 있다. 수동댐핑은 LCL 필터의 공진을 억제하기 위해 필터인덕터 및 필터커패시터에 직렬 또는 병렬로 실제의 저항을 삽입하며, 적용이 간단하고 안정적인 장점을 갖지만 댐핑저항에서의 소비전력으로 인해 시스템의 효율을 악화시키는 단점을 갖는다. 능동댐핑 기법은 공진억제를 위한 저항을 제어적으로 모사함으로써 수동댐핑방식 공진억제의 강점을 유지하고 효율저하의 단점을 보완할 수 있는 제어방법이다<sup>[8]</sup>.

본 논문에서는 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 성능특성을 해석하고 이러한 해석을 기반으로 필터인덕터의 직렬저항을 제어적으로 모사함으로써 LCL 필터 공진현상에 따른 주입전류의 THD를 저감하기 위한 필터인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 기법을 제안하며 HILS 실험을 통해 제안하는 능동댐핑 기법의 성능을 검증한다.

## 2. LCL 필터해석

### 2.1 이상적인 LCL 필터해석

그림 1은 이상적인 LCL 필터를 갖는 3상 계통연계형 인버터의 토폴로지를 나타낸다. 여기서  $V_{dc}$ 는 dc link 전압,  $L_f$ 는 인버터 측 필터인덕터,  $L_g$ 는 계통 측 필터인덕터,  $C_f$ 는 필터커패시터를 나타낸다. 이때 3상 전원의 각 상이 대칭적이고 각 상의 부하조건이 평형이라면, 3상은 단상으로 등가화 할 수 있다. 그림 2는 LCL 필터의 입력전원이 되는 계통연계형 인버터의 출력전압이 대칭적이고 LCL 필터의 부하조건이 되는 계통입피턴스가 평형인 조건으로 가정함에 따른 3상 LCL 필터의 단상등가 LCL 필터를 나타낸다. 그림 3은 단상등가 LCL 필터의 블록다이어그램을 나타낸다.

그림 3의  $V_I$ 는 인버터의 출력전압을 나타내며, LCL 필터의 블록다이어그램을 통해 LCL 필터의 외란요소는 계통전압  $V_g$ 임을 알 수 있다. LCL 필터의 인버터 출력전압에 따른 계통주입전류 제어특성은 레귤레이션 특성분석을 통해 해석할 수 있다. 식 (1)은 LCL 필터의 레귤레이션 특성을 나타내는 전달함수를 나타낸다. 식 (1)을 통해 3차 시스템인 LCL 필터의 전달함수는 1차 시스템과 2차 시스템으로 분리하여 해석할 수 있음을 알 수 있고 2차 시스템에 의한 LCL 필터의 공진주파수는 식 (2)와 같다.

그림 4는 기생성분을 포함하지 않은 이상적인 LCL

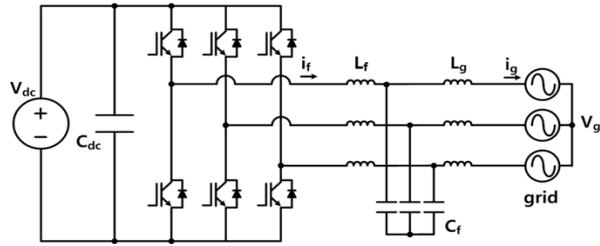


Fig. 1. Three-phase grid-connected inverter with LCL filter.

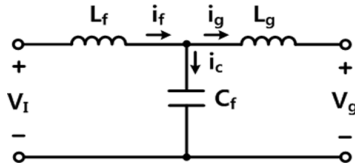


Fig. 2. Single-phase equivalent LCL filter in three-phase system.

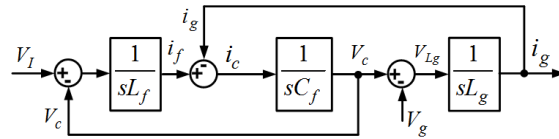


Fig. 3. Block diagram of ideal LCL filter.

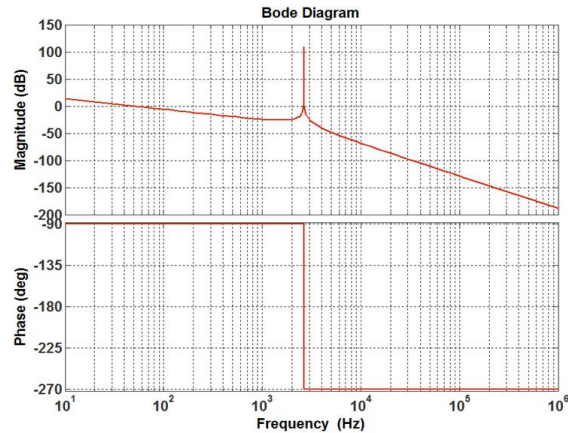


Fig. 4. Bode plot of regulation characteristic in LCL filter.

필터의 레귤레이션 특성에 따른 보드선도를 나타낸다. LCL 필터의 레귤레이션 특성의 경우 LCL 필터의 공진주파수를 기준으로 인버터 출력전압에 대한 계통주입전류의 감쇠특성이 변화함을 알 수 있으며, LCL 필터의 감쇠비는 공진주파수 이전까지 전체 인덕턴스에 해당하는 L 필터의

$$\frac{I_g(s)}{V_I(s)} = \frac{1}{L_f L_g C_f} \frac{1}{s(s^2 + \frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f})} \quad (1)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f}} \quad (2)$$

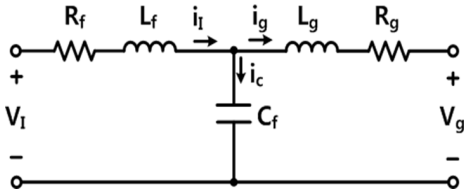


Fig. 5. Single-phase equivalent LCL filter with series resistances of inductors in three-phase system.

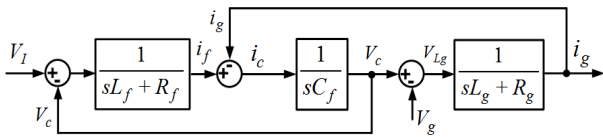


Fig. 6. Block diagram of LCL filter with series resistances of inductors.

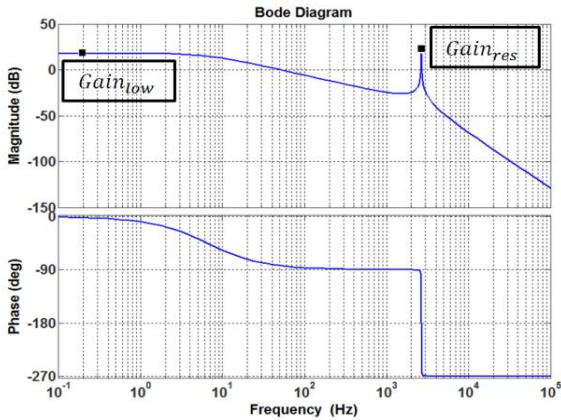


Fig. 7. Bode plot of regulation characteristic in LCL filter with series resistances of inductors.

감쇠비와 동일한  $-20\text{dB/decade}$ 를 갖으며 공진주파수 이후에는  $-60\text{dB/decade}$ 의 감쇠비를 갖는다.

## 2.2 필터인덕터 내부저항을 고려한 LCL 필터해석

그림 5는 인버터 출력전압이 대칭적이고 계통임피던스가 평형인 조건에 따른 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 3상 LCL 필터의 단상등가 LCL 필터를 나타낸다. 그림 5의  $R_f$ 는 인버터 측 필터인덕터  $L_f$ 의 직렬내부저항을 나타내고  $R_g$ 는 계통 측 필터인덕터  $L_g$ 의 직렬내부저항을 나타낸다.

그림 6은 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 블록다이어그램을 나타내고, 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 인버터 출력전압에 따른 계통주입전류 제어특성은 그림 6의 블록다이어그램에 의해 유도된 식 (3)의 전달함수를 통해 해석할 수 있다.

$$\frac{I_g(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{s^3 + s^2 \left( \frac{R_f}{L_f} + \frac{R_g}{L_g} \right) + s \left( \frac{R_f R_g}{L_f L_g} + \frac{1}{L_f C_f} + \frac{1}{L_g C_f} \right) + \frac{R_f + R_g}{L_f L_g C_f}} \quad (3)$$

식 (3)을 통해 필터인덕터와 필터인덕터 직렬내부저항의 비율은 LCL 필터 전달함수의 특성을 결정짓는 주요한 인자임을 알 수 있으며, 전달함수의 용이한 해석을 위해 필터인덕터와 직렬내부저항의 비율을 각 필터인덕터의 시정수로 표현하면 식 (3)의 전달함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_g(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{s^3 + s^2 \left( \frac{1}{\tau_f} + \frac{1}{\tau_g} \right) + s \left( \frac{1}{\tau_f \tau_g} + \frac{1}{L_{eff} C_f} \right) + \frac{1}{\tau_f L_f C_f} + \frac{1}{\tau_g L_g C_f}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\tau_f$ 는 인버터 측 필터인덕터의 시정수를 의미하고  $\tau_g$ 는 계통 측 필터인덕터의 시정수를 의미한다. 이때,  $\tau_f$ 와  $\tau_g$ 가  $\tau$ 로 동일하다면, 식 (4)의 전달함수를 식 (5)와 같이 1차 시스템과 2차 시스템으로 분해할 수 있다.

$$\frac{I_g(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{\left( s + \frac{1}{\tau} \right) \left( s^2 + \frac{1}{\tau} s + \frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f} \right)} \quad (5)$$

식 (5)를 통해 인버터 측 필터인덕터의 시정수와 계통 측 필터인덕터의 시정수가  $\tau$ 로 동일하다면, 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 공진주파수는 이상적인 LCL 필터와 마찬가지로 식 (2)와 같고 필터인덕터 직렬내부저항에 의한 계동비  $\zeta$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_{res}\tau} = \frac{R_f}{2\omega_{res}L_f} = \frac{R_g}{2\omega_{res}L_g} = \frac{(R_f + R_g)}{2\omega_{res}(L_f + L_g)} \quad (6)$$

식 (6)을 통해 인버터 측 필터인덕터의 시정수와 계통 측 필터인덕터의 시정수가 동일함은 필터인덕터의 전체 인덕턴스와 전체 내부직렬저항의 비가 일정함을 의미하고 이는 LCL 필터의 계동비  $\zeta$ 가 필터인덕터 직렬내부저항에 정비례하고 필터인덕터의 전체 인덕턴스에 반비례함을 의미한다.

그림 7은 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 레귤레이션 특성에 따른 보드선도를 나타내며, 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터는 저주파영역에서 일정한 Gain을 갖는 특성을 나타낸다. 식 (7)은 저주파 영역에서 LCL 필터의 Gain 크기를 나타낸다.

$$\text{Gain}_{low} = -20\log(R_f + R_g) \quad (7)$$

$$\text{Gain}_{res} = 20\log \frac{1}{(L_f + L_g)\omega_{res}} - 20\log 2\zeta \quad (8)$$

식 (7)을 통해 저주파영역의 Gain은 필터인덕터의 직렬내부저항에 의해 결정됨을 알 수 있다. 일정한 Gain 이후 공진주파수 이전까지 LCL 필터의 감쇠비는 필터인덕터의 전체 인덕턴스에 해당하는 L 필터의 감쇠비와

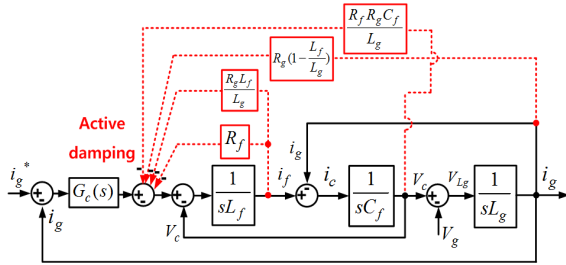


Fig. 8. Block diagram for active damping method with virtual resistances of inductors.

동일한  $-20\text{dB/decade}$ 를 갖으며, 공진주파수 이후에는  $-60\text{dB/decade}$ 의 감쇠비를 갖는다. 식 (8)은 공진주파수대에서 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터가 갖는 Gain을 나타내며, 식 (8)을 통해 인버터 출력전류의 공진성분이 필터인덕터의 직렬저항에 의해 제한됨을 알 수 있다.

### 3. 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑

이와 같이 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터해석을 통해 LCL 필터의 공진은 필터인덕터 직렬저항 성분에 의해 제어될 수 있음을 확인 하였다. 그림 6의 LCL 필터 블록다이어그램에서 필터인덕터의 직렬저항은 블록다이어그램의 변환법칙에 의해 필터인덕터에 흐르는 전류의 상태피드백 경로로 증가화 될 수 있으며, 이는 필터인덕터의 직렬저항이 제어적으로 모사될 수 있음을 의미한다.

그림 8은 필터인덕터 직렬저항을 고려한 LCL 필터해석을 기반으로 하는 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑 전류제어 블록도이다. 제안하는 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑은 3개의 상태피드백(state feedback) 제어경로를 갖으며, 각각의 상태피드백 제어대상은 인버터 측 필터인덕터 전류 및 계통전류, 필터커패시터 전압이다. 이 때, 계통전류는 기본적으로 주요한 제어대상이기 때문에 측정이 필수적이며, 필터커패시터전압은 계통전압과 동기하기 때문에 필터커패시터전압의 상태피드백 제어는 계통전압의 상태피드백 제어로 대체 할 수 있다. 이때, 계통전압은 계통전류와 마찬가지로 주입전류의 PLL을 위해 필수측정 대상이다. 그러므로 제안하는 능동댐핑은 인버터 측 필터인덕터 전류 이외의 추가적인 센서가 필요하지 않다.

$$R_f = 2\zeta\omega_{res}L_f \quad (9)$$

$$R_g = 2\zeta\omega_{res}L_g \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)은 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑을 위한 가상직렬저항 설계방법을 나타내며, 가상직렬저항 설계방법은 필터인덕터 직렬저항을 고려한 전달함수 해석에 따른 식 (6)을 통해 유도되었다. 이를 통해

TABLE I  
SPECIFICATION OF THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTER

Parameter	Value
Rated power( $P_{rated}$ )	3kW
Grid line-to-line voltage( $V_g$ )	380V <sub>ac</sub>
DC link voltage( $V_{dc}$ )	800V <sub>dc</sub>
Grid frequency( $f_g$ )	60Hz
Switching frequency( $f_{sw}$ )	8kHz
Inverter side filter inductance( $L_f$ )	1.541mH
Grid side filter inductance( $L_g$ )	1.541mH
Filter capacitance( $C_f$ )	4.7uF

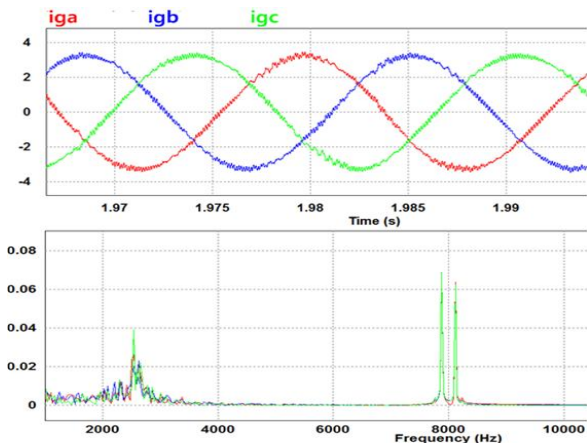


Fig. 9. Three-phase grid current and FFT without proposed active damping in simulation (Load: 50%).

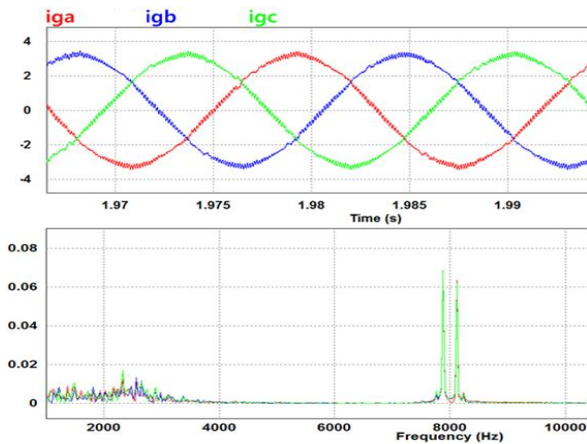


Fig. 10. Three-phase grid current and FFT with proposed active damping in simulation (Load: 50%).

가상직렬저항은 공진주파수 및 제동비  $\zeta$ , 필터인덕턴스에 비례함을 알 수 있다.

## 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 4.1 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안한 필터인덕터 가상직렬저항 능동



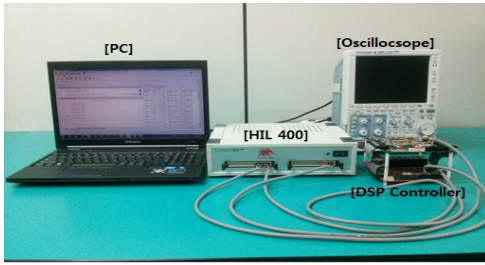


Fig. 11. Experimental equipment for three-phase grid-connected inverter using HIL-400.

TABLE II  
SPECIFICATION OF HIL-400

Parameter		Value
Digital Input	Channels	32ch
	High threshold voltage	2V <sub>(min)</sub>
	Low threshold voltage	0.8V <sub>(max)</sub>
Analog Output	Channels	16ch
	Tolerance	3%
	Output voltage range	±5V
Calculation update rate		2MHz
Calculation update period		0.5μs

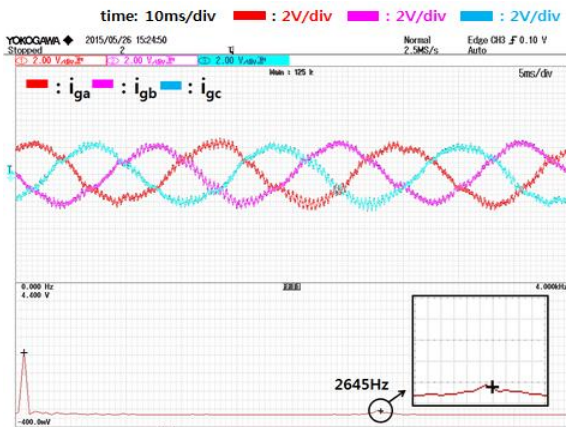


Fig. 12. Three-phase grid current and FFT without proposed active damping in experiment using HILS (Load: 50%).

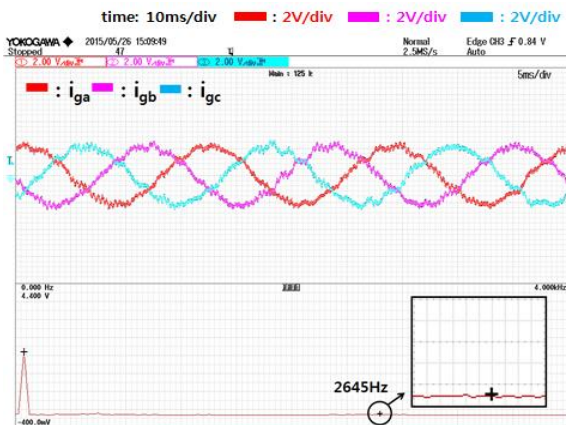


Fig. 13. Three-phase grid current and FFT with proposed active damping in experiment using HILS (Load: 50%).

댐핑 기법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 PSIM을 사용하였으며, 시뮬레이션 및 실험에서 사용된 3상 계통연계형 인버터의 설계사양은 표 1과 같다. 본 논문의 부하조건은 인버터의 출력 계통전류의 한계 상황에서 제안하는 능동댐핑의 개선능력을 보이고자 50% 부하조건을 적용하였다.

그림 9는 능동댐핑이 적용되지 않은 시뮬레이션 3상 계통전류 파형 및 FFT를 나타내고 그림 10은 제안된 능동댐핑을 적용한 시뮬레이션 3상 계통전류 파형 및 FFT를 나타낸다. 제안된 능동댐핑을 적용한 경우 a상 계통전류 THD는 3.57%로서 미적용 방식의 4.30%에 비하여 약 80% 작다. 또한 제안된 능동댐핑을 적용한 경우 공진전류의 최대값은 17mA로서 미적용 방식의 39mA에 비하여 약 3배 저감된 것을 알 수 있다.

## 4.2 실험 결과

본 연구에서는 Typhoon-Hil사의 HILS 장비인 HIL-400을 이용하여 하드웨어 구현 및 제안하는 필터인덕터 가상 직렬저항 능동댐핑 전류제어기의 성능을 검증하였다. 그림 11은 HIL-400을 이용한 제안한 능동댐핑 전류제어 실험의 시스템 구성을 나타낸다. 표 2는 제안한 능동댐핑 성능검증실험에 사용된 HIL-400의 사양을 나타낸다. HIL-400의 디지털 입력채널은 3상 계통연계형 인버터의 계통전류제어를 위한 DSP 제어기의 스위치 제어 PWM 출력을 측정하며, HIL-400의 아날로그 출력채널은 DSP 제어기의 스위치 제어 PWM출력에 따른 계통전류를 아날로그 형태로 출력하고 출력스케일은 0.33V/A이다.

그림 12는 HILS 실험에 따른 능동댐핑이 적용되지 않은 3상 계통전류 실험파형 및 FFT를 나타내고 그림 13은 HILS 실험에 따른 제안된 능동댐핑을 적용한 3상 계통전류 실험파형 및 FFT를 나타낸다. 제안된 능동댐핑 미적용 및 적용 실험에 따른 a상 계통전류 THD는 각각 7.94%와 4.37%로서 약 55% 저감된 것을 볼 수 있다. 또한 공진전류의 최대값은 각각 185.9mA와 39.8mA로서 제안된 능동댐핑이 적용된 전류의 공진성분은 능동댐핑이 적용되지 않은 전류의 공진성분에 비해 약 5배 저감된 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 인버터에 널리 사용되는 LCL 필터의 필터인덕터 직렬내부저항을 고려한 해석방법을 제시하였고 이러한 해석을 기반으로 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑 기법을 제안하였다. 제안된 능동댐핑 기법의 성능을 시뮬레이션 및 HILS를 사용하여 계통전압을 다양하게 설정한 실험을 통해 검증하였으며, 시뮬레이션 및 실험 결과 제안된 필터인덕터 가상직렬저항 능동댐핑 기법이 단순 전류제어에 비해 우수한 공진전류 저감효과를 나타내는 것을 확인하였다.

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학협력 기술개발사업(기업부설연구소 신규설치)(No. C0268243)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.



### 김용중(金龍中)

1988년 11월 10일생. 2007년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 석사졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.



### 김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.

## References

- [1] E. Rikos, S. Tselepis, and C. Hoyer-Klick, "Stability and power quality issues in microgrids under weather disturbances," *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal*. Vol 1. pp. 170-179, Sep. 2008.
- [2] IEEE std. 519-1992-IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems - IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society.
- [3] T. Abeyasekera, C. M. Johnson, and D. J. Atkinson, "Suppression of line voltage related distortion in current controlled grid connected inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*. Vol. 20, pp. 1393-1401, Nov. 2005.
- [4] M. Prodanović and T. C. Green, "Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection," *Power Electronics, IEEE Transactions on*. Vol. 18, pp. 373-380, Jan. 2003.
- [5] Y. Lei, Z. Zhao, F. He, S. Lu and L. Yin, "An improved virtual resistance damping method for grid-connected inverters with LCL filters," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, pp. 3816-3822, Sep. 2011.
- [6] D. Pan, X. Ruan, X. Wang, C. Bao and W. Li, "Robust capacitor-current-feedback active damping for the LCL-type grid-connected inverter," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, pp. 728-735, Sep. 2013.
- [7] A. Reznik, M. G. Simoes, A. Al-Durra and M. S. Mueeen, "Filter design and performance analysis for grid-interconnected systems," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 50, pp. 1225-1232, Mar. 2014.
- [8] B. W. An, H. K. Shin, H. W. Cho, Y. K. Han, and B. M. Han, "Active Damping of LCL Filter for Three-phase PWM Inverter without Additional Hardware Sensors" *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-17, Sep. 2013.