

# LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 동기좌표계 PI 전류제어 안정도 해석

조종민<sup>1</sup>, 이태진<sup>1</sup>, 윤동현<sup>1</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## Analysis of Current Control Stability using PI Control in Synchronous Reference Frame for Grid-Connected Inverter with LCL Filter

Jongmin Jo<sup>1</sup>, Taejin Lee<sup>1</sup>, Donghyun Yun<sup>1</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

### Abstract

In this paper, current control using PI controller in the synchronous reference frame is analyzed through the relationship among bandwidth, resonance frequency, and sampling frequency in the grid-connected inverter with LCL filter. Stability is investigated by using bode plot in frequency domain and root locus in discrete domain. The feedback variable is the grid current, which is regulated by the PI controller in the synchronous reference frame. System delay is modeled as 1.5Ts, which contains computational and PWM modulator delay. Two resonance frequencies are given at 815 Hz and 3.16 kHz from LCL filter parameters. Sufficient phase and gain margins can be obtained to guarantee stable current control, in case that resonance frequency is above one-sixth of the sampling frequency. Unstable current control is performed when resonance frequency is below one-sixth of the sampling frequency. Analysis results of stability from frequency response and discrete response is the same regardless of resonance frequency. Finally, stability of current control based on theoretical analysis is clearly verified through simulation and experiment in grid-connected inverters with LCL filter.

**Key words:** LCL filter, Grid-connected inverter, Current control, Stability analysis

### 1. 서 론

PWM 기법을 기반으로 하는 계통연계형 인버터는 계통에 안정한 전류를 공급하기 위해서 일반적으로 인버터 출력단에 L 필터를 적용함으로써 3상전류에 포함된 스위칭 주파수 리플 성분을 저감하였다. 그러나, 효율적인 스위칭 리플 저감 효과를 증대시키기 위해서는 큰 값을 갖는 L 필터가 필수적이며, 이로부터 필터 설계에 요구되는 체적 및 비용 증가를 수반한다. 최근에는 L 필터를 대체하는 LCL 필터가 계통연계형 인버터를 비롯

한 다양한 분야에서 적용범위를 넓혀가고 있다<sup>[1]</sup>. LCL 필터는 기존 L 필터보다 더 작은 값의 필터 설계로 효율적인 스위칭 리플 저감 효과를 갖기 때문에 체적감소 및 비용절감의 장점을 갖는다. 하지만, LCL 필터는 수동소자들에 의한 공진문제를 포함하고 있으며, 이는 전류제어를 수행하는 시스템 전체에 불안정성을 야기하는 직접적인 원인이 되기 때문에 전류제어의 안정성을 보장할 수 없다. 따라서, 이러한 LCL 필터의 공진문제를 해결하기 위한 다양한 댐핑 기법들에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 수동댐핑과 능동댐핑 방식으로 분류할 수 있다. 공진을 저감하기 위해 가장 쉽게 구현할 수 있는 댐핑 기법은 수동댐핑 방식 중에서 필터 커패시터에 직렬로 저항을 삽입하는 방식이다<sup>[2]</sup>. 삽입된 직렬저항은 댐핑 요소의 역할을 수행하는 장점을 갖는 반면, 커패시터를 통해 흐르는 고조파 전류 성분으로 인해 불필요한 전력손실을 발생시킴으로써 인버터의 효율을 감소시키는 단점을 갖는다. 댐핑 저항에 의해 발생하는 손실을 감소하기 위해 복잡성이 증가하지만 필터 커패시터와

Paper number: TKPE-2016-21-2-10

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

<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University  
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National Univ.  
Manuscript received Jan. 28, 2016; revised Feb. 22, 2016;  
accepted Feb. 29, 2016

— 본 논문은 2015년 추계학술대회 우수추천논문임

저항 단에 추가적인 수동소자들을 적용하는 방식들도 연구되고 있다<sup>[3]</sup>. 또한, 제어 알고리즘 측면에서 필터공진을 저감시키는 다양한 능동댐핑 기법들이 주목받고 있다. 필터 커패시터 전압<sup>[4]</sup>이나 전류 변수를 제어 알고리즘에 추가하는 방식<sup>[5-6]</sup>이나 저역 통과 필터, 노치 필터<sup>[7]</sup> 등을 이용하는 필터 기반의 방식들이 대표적인 능동댐핑 기법이다. 이러한 능동댐핑 기법들은 불필요한 전력손실을 발생하지는 않으나, 제어 알고리즘의 구조적인 복잡성이 증가한다. 앞서 언급한 수동댐핑이나 능동댐핑 기법의 적용 없이 계통전류만을 제어함으로써 LCL 필터의 공진영향 없이 안정적인 전류제어가 가능하다. LCL 필터가 적용된 인버터 시스템의 전류제어는 샘플링 주파수와 공진 주파수의 관계, 제어기 대역폭의 선정 등은 제어기 설계 및 파라미터 결정에 중요한 요소이다<sup>[8]</sup>. 충분한 위상 및 이득여유를 확보하기 위해 중요 요소들 간의 관계 분석으로부터 공진주파수를 적절한 주파수 영역에 배치하면, 추가적인 댐핑기법 없이 정좌표계 축에서 안정한 전류제어를 수행할 수 있다<sup>[9]</sup>.

본 논문에서는 동기좌표계 축에서 비례-적분 제어기가 적용된 전류제어 구조를 기반으로 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어 안정도를 분석하고 검증하였다. 안정한 전류제어를 수행하기 위한 샘플링 주파수, 공진주파수 및 제어기 대역폭 간의 관계를 분석하였으며, 1.5T<sub>s</sub> 시스템 시지연을 고려하여 주파수 영역과 이산시간 영역에서 전류제어 안정도를 해석하였다. 또한, 7kW 계통연계형 인버터 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 전류제어의 안정도를 검증하였다.

## 2. LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터 전류제어

### 2.1 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터 구성

그림 1은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 구성을 보여준다. 3상 3선식 계통연계형 인버터 구조로써 배터리 뱅크, DC-AC 인버터 및 LCL 필터로 구성된다. L<sub>1</sub>은 인버터 측 필터 인덕터, L<sub>2</sub>는 계통 측 필터 인덕터이며 C<sub>f</sub>는 필터 커패시터를 나타낸다. LCL 필터의 공진주파수는 식 (1)을 통해 유도될 수 있으며, 수동소자에 의해서만 결정된다. L 필터 기반의 계통연계형 인버터의 경우, 전류제어를 수행하기 위한 제어 변수는 1개만 존재하는 반면, LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어는 인버터 측 전류나 계통 측 전류가 제어 변수 대상이 될 수 있다. 본 논문에서는 계통연계형 인버터의 안정한 전류제어 수행 및 단위 역률 제어를 수행하기 위해 계통 측 전류 I<sub>2</sub>를 제어 대상으로 피드백 하여 전류 제어를 수행한다. LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 해석에 대한 복잡성을 줄이기 위해 계통전압은 이상적인 전압원으로 가정하였으며, 각 수동필터에 포함된 내부등가 직렬저항은 무시하였다.

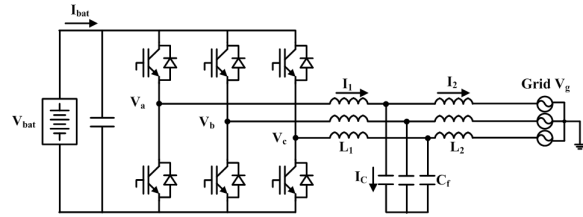


Fig. 1. Configuration of grid-connected inverter with LCL filter.

TABLE I  
PARAMETERS OF GRID-CONNECTED INVERTER  
WITH LCL FILTER

Parameter	Symbol	Value
Rated Power	P	7kW
Rated grid voltage	V <sub>g</sub>	220V <sub>rms</sub>
Switching/Sampling frequency	f <sub>s</sub>	10kHz
Inverter side inductance	L <sub>1</sub>	1.1mH
Grid side inductance	L <sub>2</sub>	0.33mH
Filter capacitor	C <sub>f</sub>	10uF
		150uF

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

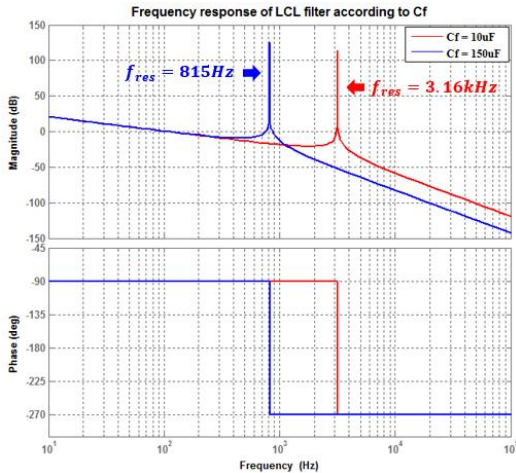
표 1은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 파라미터를 보여준다. 스위칭 및 샘플링 주파수는 10kHz이다. 인버터 및 계통 측 필터 인덕터는 고정 값이며, 필터 커패시터는 10uF과 150uF을 적용하였다. 따라서, LCL 필터의 공진주파수는 필터 커패시터 값에 따라 달라지며, 식 (1)에 의해 각각 3.16kHz와 815Hz로 계산된다.

### 2.2 동기좌표계 전류제어 기반의 주파수 관계 분석

그림 2는 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어 구조도이다. 앞서 언급한 바와 같이, 계통 측 전류가 제어 대상으로 피드백 되는 구조이며, 동기좌표계 축으로 좌표변환을 통해 벡터제어를 수행한다. 동기좌표계 축 상에서 구현된 계통연계형 인버터의 전류제어는 각각 비례-적분 제어기, 인버터 시스템 시지연 및 LCL 필터 블록으로 구성된다. 비례-적분 제어기는 동기좌표계 축에서 기본파의 정상분 전류를 제어하는 역할로써 전류 지령치와 좌표변환을 통해 직류 값으로 변환된 계통 측 전류 피드백 성분과의 오차를 0으로 수렴하도록 제어한다. 식 (2)는 비례-적분 제어기의 주파수 전달함수이며, 그림 3은 LCL 필터의 주파수 응답특성을 보여준다. 공진주파수보다 낮은 저주파수 영역에서의 LCL 필터의 주파수 응답특성은 인버터 측과 계통 측



Fig. 2. Block diagram of current control with LCL filter.

Fig. 3. Frequency response of LCL filter transfer function according to  $C_f$ .

인덕터를 합한 L 필터의 특성과 동일한 이득 및 위상 특성을 갖는다. 식 (3)은 인버터 전체 시스템의 시지연 특성을 나타내는 전달함수로써, 디지털 구현에 의한 DSP 프로세싱 및 PWM 모듈레이터 지연특성을 고려함으로써  $1.5T_s$  시지연 함수로 표현하였다. 식 (4)는 LCL 필터의 전달함수이며, 인버터 출력전압에 대한 계통 측 전류의 전달함수를 나타낸다. 표 1에 주어진 파라미터를 이용한 LCL 필터의 주파수 응답특성은 그림 3을 통해 확인할 수 있다. LCL 필터는 원점 극점에 의해  $90^\circ$  위상지연 특성을 갖으며, 공역 복소쌍인 공진극점에 의해 공진주파수 지점에서  $180^\circ$ 의 추가적인 위상지연이 발생한다.

$$G_{PI}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2)$$

$$G_d(s) = e^{-s * 1.5 T_s} \quad (3)$$

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{s L_1} * \frac{z_{LC}^2}{s^2 + w_{res}^2}, z_{LC} = \sqrt{(L_2 C_f)^{-1}} \quad (4)$$

식 (5)는 동기좌표계 축에서 표현된 전류제어의 개루프 전달함수이다. 비례 제어기의 이득은 전류제어의 대역폭을 결정하는 중요한 요소로써 LCL 필터공진과 상호간섭 영향을 피하기 위해 대역폭은 항상 공진주파수보다 낮은 주파수 영역에 위치해야 한다. 따라서, 비례-적분 제어기는 저주파수 영역에서 설계되기 때문에 공

진주파수 부근에서 전류제어 시스템의 위상지연 요소가 아니므로, 전체 전류제어 시스템의 안정도에 영향을 미치지 않는다. 식 (3)에 주어진  $1.5T_s$ 로 표현된 전류제어 시스템의 시지연 함수의 위상지연 응답특성은 전류제어 시스템의 샘플링 주파수에 의해 결정된다. 따라서, 시스템 시지연 함수의 특성에 의해 샘플링 주파수의 1/6이 되는 주파수 지점은 전류제어의 개루프 전달함수 위상이  $-180^\circ$ 가 되는 주파수 지점이 된다. 따라서, LCL 필터의 공진주파수가 샘플링 주파수의 1/6에 해당하는 주파수 보다 높은 영역에 위치하면 안정한 전류를 수행하기 위한 충분한 위상 및 이득 여유를 확보할 수 있다. 그러나, 공진주파수가 샘플링 주파수의 1/6보다 낮은 주파수 영역에 존재한다면, 공진주파수 특성에 의해서 위상 및 이득 여유가 없기 때문에 시스템 전체가 불안정해지는 특성을 야기할 수 있다. 식 (6)은 LCL 필터의 공진영향 없이 안정한 전류제어를 수행하기 위한 주파수 간의 관계를 보여준다.

$$G_{ol}(s) = k_p e^{-1.5s T_s} \frac{T_i s + 1}{L_1 L_2 C_f T_i s^4 + (L_1 + L_2) T_i s^2} \quad (5)$$

$$f_{BW} < \frac{f_s}{6} < f_{res} \quad (6)$$

### 3. LCL 필터를 사용하는 전류제어 안정도 해석

LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 안정도 해석은 보드선도를 이용한 주파수 응답특성과 근궤적을 이용한 이산시간 응답특성을 통해 분석하였다. LCL 필터의 파라미터 값은 표 1에 제시된 값을 이용하였으며, 필터 커패시터 값에 따른 2가지 공진주파수에 대한 전류제어 안정도를 해석하였다.

#### 3.1 공진주파수 3.16kHz 조건의 전류제어 안정도 해석

그림 4는  $L_1 = 1.1\text{mH}$ ,  $L_2 = 0.33\text{mH}$ ,  $C_f = 10\mu\text{F}$  조건에서 전류제어의 안정도 해석을 위한 주파수 응답특성으로 각 파라미터를 식 (5)에 적용한 결과이다. 위 조건에서 공진주파수는 3.16kHz이며, 샘플링 주파수의 1/6은 1.67kHz이고, 전류제어기 대역폭은 750Hz이다. 2.2절에서 정의된 식 (6)의 조건을 만족한다. 따라서, 공진주파수는 샘플링 주파수의 1/6 지점 주파수보다 높은 영역에 위치하고 있기 때문에 전류제어 개루프 전달함수의 위상이  $-180^\circ$ 인 주파수는 샘플링 주파수의 1/6 지점과 동일하다는 것을 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 이 때, 주파수 응답특성으로부터 전류제어의 위상여유는  $60^\circ$ , 이득여유는 7dB이다. 따라서, 충분한 위상 및 이득여유를 확보함으로써 공진영향 없이 안정한 전류제어를 수행할 수 있다.

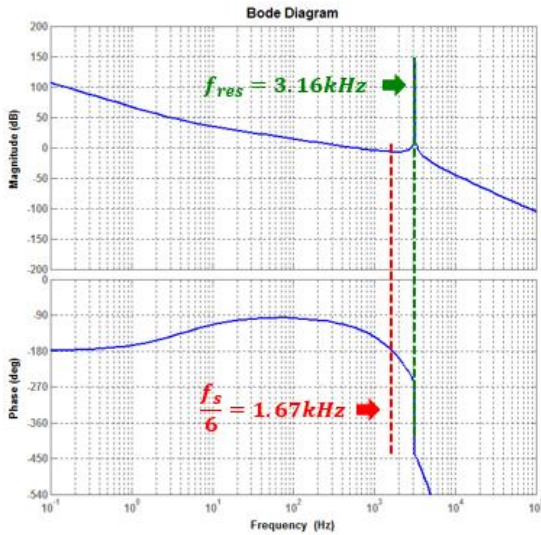


Fig. 4. Stability analysis of current control using frequency response under  $f_{res} = 3.16\text{kHz}$ .

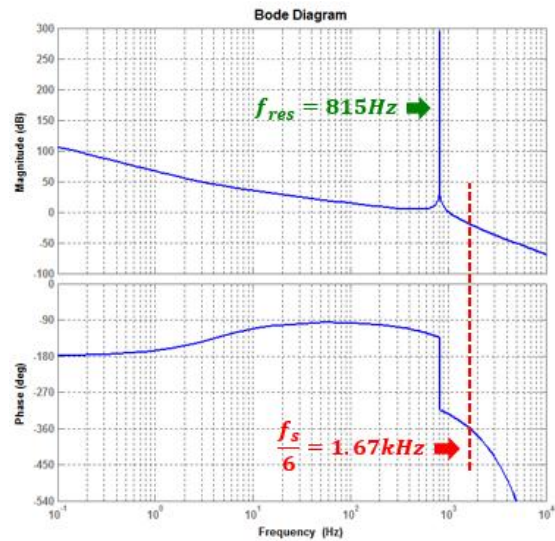


Fig. 6. Stability analysis of current control using frequency response under  $f_{res} = 815\text{Hz}$ .

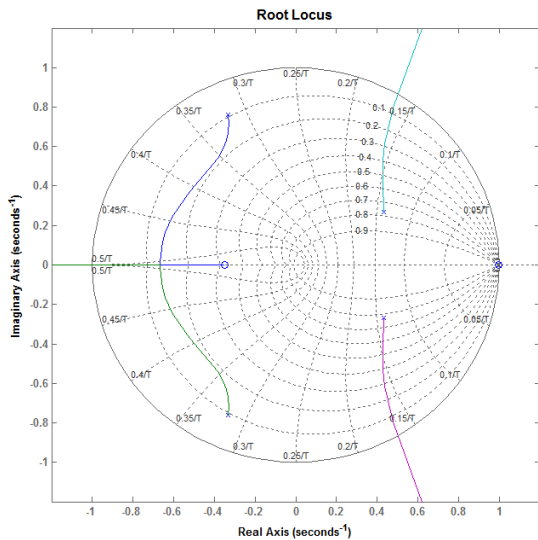


Fig. 5. Stability analysis of current control using discrete time response under  $f_{res} = 3.16\text{kHz}$ .

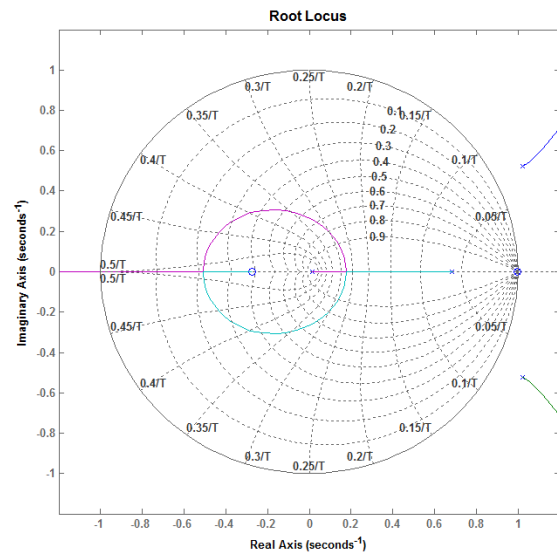


Fig. 7. Stability analysis of current control using discrete time response under  $f_{res} = 815\text{Hz}$ .

그림 5는 동일 조건에서 비례이득  $k_p$  변화에 따른 이산시간 영역에서의 근궤적을 이용한 전류제어 안정도 해석 결과이다. 식 (2)~(4)의 주파수 전달함수는  $z$ 변환을 적용함으로써 이산시간 영역의 전달함수로 변환하였다. 전류제어 전달함수의 특성방정식으로부터 적용된 비례이득  $k_p$ 에 대하여 초기에 모든 극점들은 단위원 내에 위치하고 있으며, 전류제어기의 안정도를 보장할 수 있음을 의미한다. 따라서, 전류제어기에 적용된 이득으로부터 안정한 전류제어를 수행할 수 있다. 또한, 비례이득  $k_p$ 가 증가함에 따라 모든 극점들의 위치 변화를 볼 수 있으며, 단위원 안에 존재할 수 있는 허용 가능한 이득 범위 내에서 안정한 전류제어가 수행될 수 있다. 결론적으로 주파수 응답특성과 이산시간 응답특성으로부터 동일한 전류제어 안정도 해석결과를 도출하였다.

### 3.2 공진주파수 815Hz 조건의 전류제어 안정도 해석

그림 6은  $L_1 = 1.1\text{mH}$ ,  $L_2 = 0.33\text{mH}$ ,  $C_f = 150\mu\text{F}$  조건에서 전류제어의 안정도 해석을 위한 주파수 응답특성으로 식 (5)를 이용한 응답특성 결과이다. 공진 주파수는 815Hz이며, 샘플링 주파수의 1/6 지점 주파수와 전류제어기 대역폭은 3.1절 조건과 동일한 1.67kHz, 750Hz이다. 필터 커패시터 증가에 따라 공진주파수가 낮은 주파수 영역으로 이동하였으며, 공진 주파수와 샘플링 주파수의 1/6 지점 주파수 간의 관계는 2.2절에서 정의된 식 (6)의 조건을 충족하지 않는다. 그러므로, 공진주파수는 샘플링 주파수의 1/6 지점 주파수보다 낮은 영역에 위치하고 있기 때문에 전류제어 시스템은 안정한 전류제어를 수행하기 위한 위상 및 이득여유를 확보할 수 없음을 그림 6의 주파수 응답특성 결과로부터 확인할

수 있다. 따라서, 전체 전류제어 시스템은 공진영향으로 인해 불안정한 특성을 갖는다.

그림 7은 동일 조건에서 비레이득  $k_p$  변화에 따른 이산시간 영역에서의 근계적을 이용한 전류제어 안정도 해석 결과이다. 그림 7의 결과로부터 적용된 비레이득  $k_p$ 에 대해 공액 복소 공진 극점이 단위원의 외부에 존재하고 있으며, 근계적 해석으로부터 전류제어 시스템은 불안정한 특성을 야기한다. 비레이득  $k_p$ 를 증가시킨 경우에도 공액 복소 공진 극점은 단위원으로부터 점점 더 멀어지기 때문에 시스템의 불안정성은 더욱 커진다. 이로부터, 비레이득에 관계없이 이와 같은 조건에서는 시스템의 안정도는 보장할 수 없다. 주파수 응답특성 및 이산시간 응답특성 결과로부터 동일한 전류제어 안정도 해석결과를 도출하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

##### 4.1 시뮬레이션 결과

그림 8은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 시뮬레이션 회로도이다. 그림 9는  $L_1 = 1.1\text{mH}$ ,  $L_2 = 0.33\text{mH}$ ,  $C_f = 10\mu\text{F}$  조건에 대한 7kW 계통연계형 인버터의 전류제어 시뮬레이션 결과이다. 공진 주파수는 3.16kHz로 샘플링 주파수의 1/6 지점 주파수보다 높은 영역에 존재한다. 7kW 단위역률을 제어하므로 q축 전류의 지령치는 -26A이다. 그림 9의 상단은 동기좌표계 출력 결과이다. 과도상태 구간을 포함한 정상상태 구간에서 계통 측 전류의 동기좌표계 출력  $I_{de}$ ,  $I_{qe}$ 의 평균값은 전류 지령치와 같은 결과를 얻을 수 있다. 계통 및 인버터 측 3상전류는 60Hz의 안정한 전류제어가 수행되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 공진주파수가 샘플링 주파수의 1/6보다 높은 영역에 존재한 경우 충분한 이득 및 위상 여유를 확보함으로써 안정한 전류제어를 수행할 수 있는 주파수 및 이산시간 안정도 해석결과와 동일한 시뮬레이션 결과를 도출하였다.

그림 10은  $L_1 = 1.1\text{mH}$ ,  $L_2 = 0.33\text{mH}$ ,  $C_f = 150\mu\text{F}$  조건에 대한 7kW 계통연계형 인버터의 전류제어 시뮬레이션 결과이다. 필터 커패시터 값의 증가에 따라 공진 주파수는 815Hz로 낮아진다. 따라서, 공진주파수가 샘플링 주파수의 1/6보다 낮은 경우, 인버터 측 및 계통 측 3상전류는 기본파 60Hz 제어를 수행하지 못하며, 815Hz 공진 주파수에 의해 발산하는 결과를 확인할 수 있다. 따라서, 동기좌표계 출력 및 3상전류는 불안정한 특성을 갖는다. 주파수 및 이산시간 안정도 해석 결과와 동일하게 불안정한 전류제어가 수행됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

##### 4.2 실험 결과

그림 11은 7kW 계통연계형 인버터 프로토타입으로 전류제어 안정도 해석에 적용된 표 1의 파라미터를 이용하여 안정도 해석결과를 실험을 통해 검증하였다.

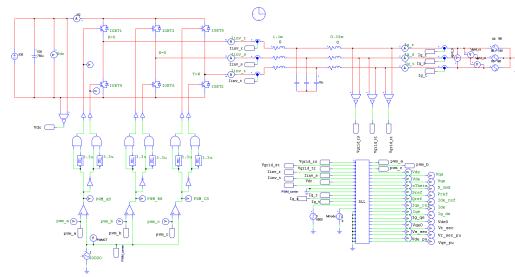


Fig. 8. Simulation circuits with LCL filter.

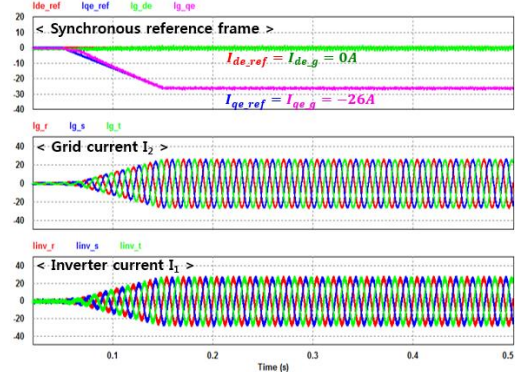


Fig. 9. Simulation results of current control under  $f_{res} = 3.16\text{kHz}$ .

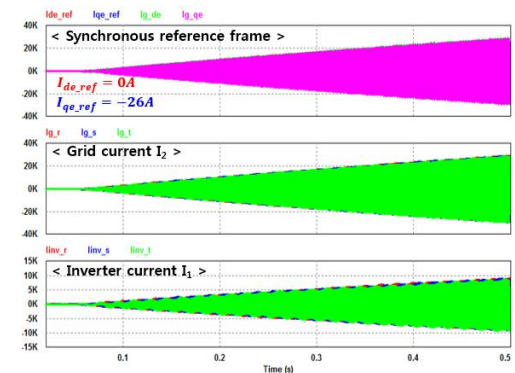


Fig. 10. Simulation results of current control under  $f_{res} = 815\text{Hz}$ .

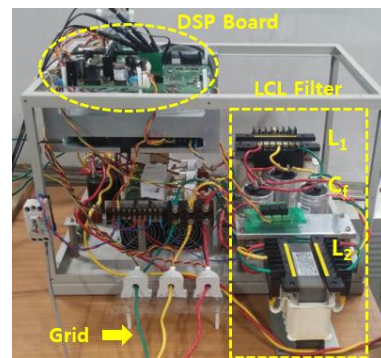


Fig. 11. Prototype of 7kW grid-connected inverter with LCL filter.

그림 12는 공진 주파수가 3.16kHz 조건에서의 7kW 계통연계형 인버터 전류제어 실험 결과이다. 동기좌표계 전류제어에 대한 d축 전류 지령치는 0A, q축 전류 지령

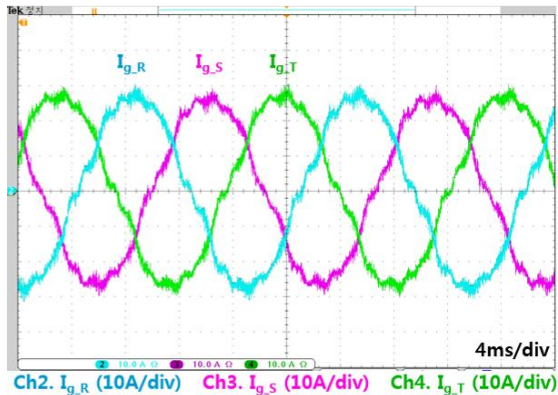


Fig. 12. Experimental result of current control under  $f_{res} = 3.16\text{kHz}$ .

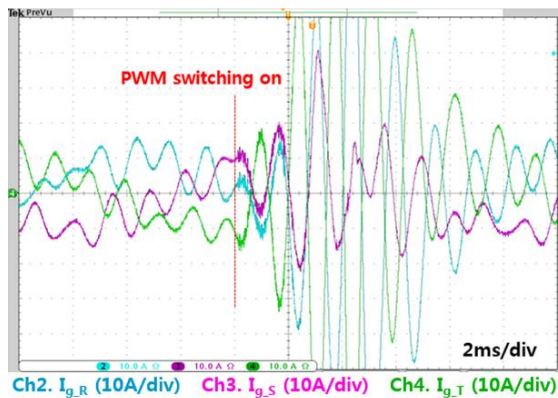


Fig. 13. Experimental result of current control under  $f_{res} = 815\text{Hz}$ .

치는  $-26\text{A}$ 이다. 동기좌표계 비례-적분 제어를 통해 정상상태에서 계통 전류의 평균값은  $d$ 축은  $0\text{A}$ ,  $q$ 축은  $-26\text{A}$ 로 전류 지령치와 동일한 값으로 안정한 전류제어가 수행되었으며, 그림 12와 같은 기본과  $60\text{Hz}$ 의 3상 계통 전류의 출력결과를 도출하였다. 인버터 데드타임에 의한 고조파 왜곡의 영향으로 인해 3상전류 및 동기좌표계 출력에는 저차 고조파 성분이 존재한다. 이러한 고조파 성분은 추가적인 제어기법을 이용해 보상함으로써 개선될 수 있다. 따라서, 주파수 및 이산시간 영역에서의 안정도 해석과 동일한 결과를 실험을 통해 검증하였다.

그림 13은 공진 주파수가  $815\text{Hz}$ 인 조건에 대한  $7\text{kW}$  계통연계형 인버터의 전류제어 실험 결과이다. 전류제어를 위한 PWM 스위칭 이후  $R$ 상은 약  $120\text{A}_{peak}$ ,  $T$ 상은 약  $80\text{A}_{peak}$  크기까지 증가하였다. 따라서, 인버터는 공진 주파수에 의한 영향으로 인해 과전류 현상이 발생함으로써 시스템을 보호하기 위한 과전류 트립이 동작하였다. 주파수 및 이산시간 안정도 해석 및 시뮬레이션 실험결과와 같이 동일한 조건 하에서는 불안정한 전류제어가 수행됨을 실험으로 검증하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 동기좌표계 축에서 비례-적분 제어기

가 적용된 전류제어 구조를 기반으로 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어 안정도를 분석하고 검증하였다. 안정한 전류제어를 수행하기 위한 샘플링 주파수, 공진 주파수 및 제어기 대역폭 간의 관계를 동기좌표계 축에서 각 전달함수의 위상특성을 통해 분석하였으며, 전류제어 구조에  $1.5T_s$  시스템 시지연 특성을 고려하였다. 필터 커패시터 값 변화에 따른 LCL 필터의 2가지 공진 주파수를 이용하여, 공진 주파수가 샘플링 주파수의  $1/6$  지점 주파수보다 높은 영역에 위치하면 안정하나, 샘플링 주파수의  $1/6$  지점 주파수보다 낮은 영역에 위치하면 불안정한 전류제어 특성을 보드선도와 근궤적을 통해 해석하였다. 또한, LCL 필터를 사용하는  $7\text{kW}$  계통연계형 인버터 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 전류제어의 안정도 해석 결과를 검증하였다. 공진 주파수가  $3.16\text{kHz}$ 인 조건에서 계통 전류의 기본과  $60\text{Hz}$  성분은 적용된 비례-적분 제어기를 통해 정상적으로 제어됨으로써 안정한 전류제어를 수행 하였다.

본 연구는 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. R15XA03-54)

## References

- [1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 53, No. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [2] M. Liserre, A. Dell' Aquila, and F. Blaabjerg, "Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier," in *Proc. PESC02*, pp. 1195-1201, Jun. 2002.
- [3] 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 converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 6, pp. 2642-2646, Jun. 2013.
- [4] B. W. An, H. K. Shin, H. W. Kim, K. Y. Cho, and B. M. Han, "Active damping of LCL filter for three-phase PWM inverter without additional hardware sensors," *Trans. KIEP*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-17, Feb. 2013.
- [5] D. E. Kim, D. C. Lee, and H. G. Kim, "Feedback linearization control of PWM converters with LCL input filters," *Trans. KIEP*, Vol. 13, No. 1, pp. 55-62, Feb. 2008.
- [6] E. Twining and D. G. Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 3, pp. 888-895, May. 2003.
- [7] R. P. Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez, and T. Kerekes, "A self-commissioning notch filter for active damping in a three-phase LCL-filter-based grid-tie

converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 12, pp. 6754-6761, Dec. 2014.

- [8] R. P. Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez, and Y. Yang, "LCL-filter design for robust active damping in grid-connected converters," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, Vol. 10, No. 4, pp. 2192-2203, Nov. 2014.
- [9] S. G. Parker, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "Regions of active damping control for LCL filters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 1, pp. 424-432, Jan./Feb. 2014.



### 조종민(趙鍾珉)

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



### 이태진(李太眞)

1990년 2월 27일생. 2014년 한밭대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.



### 윤동현(尹棟鉉)

1975년 7월 27일생. 2002년 한밭대 제어계측공학과 졸업. 2004년 충남대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2007년~2011년 국방과학연구소 선임연구원. 현재 (주)신동파워텍 연구소장.



### 차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Research Center 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.