

## 계통연계형 인버터의 LCL필터 최적 설계기법

정상혁<sup>1</sup>, 최세완<sup>†</sup>

## Optimized LCL filter Design Method of Utility Interactive Inverter

Sang-Hyuk Jung<sup>1</sup>, and Se-Wan Choi<sup>†</sup>

**Abstract** - The conventional LCL filter design method of the utility interactive inverter considers only harmonics attenuation of the current injected to the grid. However, in case of utility-interactive inverter with critical load the voltage quality of the critical load should also be considered for LCL filter design. Also, considering cost and volume of LCL filters, it is important to have minimum values of inductance and capacitance as far as the harmonic standards are satisfied. In this paper a LCL filter design method is proposed to satisfy not only the harmonic standards of the grid current during the grid-connected mode but the voltage quality of the critical load during grid-connected mode and stand-alone mode. With the proposed method optimized values of LCL filters could be obtained by applying weighting factor to voltage ripple across the critical load, inductor volume, amount of reactive current and system bandwidth.

**Keywords:** optimized LCL filter design method, LCL filter, utility-interactive inverter, weighting factor, critical load

## 명명법

$r_{Li}$	인버터 출력전류 리플율 ( $r_{Li} = I_{Li,sw}/I_{Li,1}$ )
$r_{Cf}$	중요부하의 전압리플율 ( $r_{Cf} = V_{Cf,sw}/V_{Cf,1}$ )
$r_{Lg}$	계통 주입전류 리플율 ( $r_{Lg} = I_{Lg,sw}/I_{Lg,1}$ )
$i_{Li}$	인버터 출력전류
$i_{Lg}$	계통 주입전류
$v_i$	인버터 출력전압
$v_{Cf}$	중요부하 양단전압
$m_{a,sw}$	스위칭주파수 진폭변조지수
$P_r$	인버터 출력 기본파전류에 대한 계통주입 기본파전류의 비
$\omega_1$	계통 주파수 ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ )
$Z_b$	레지스턴스 베이스값 ( $Z_b = \frac{3v_{cf}^2}{P}$ )

$L_b$	인덕턴스 베이스값 ( $L_b = \frac{Z_b}{\omega_1}$ )
$C_b$	캐패시턴스 베이스값 ( $C_b = \frac{1}{\omega_1 Z_b}$ )
$\omega_{res}$	LCL필터 공진주파수 ( $\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}}$ )

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 수요증가 및 화석자원 고갈 위기로 연료전지, 태양광 및 풍력 등 신재생 에너지의 보급에 대한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 신재생 에너지의 보급이 확산되면서 신재생에너지원을 분산발전의 형태로 계통에 접속하기 위하여 계통연계 기술이 요구되고 있고, 그에 따라 전력변환 장치인 계통연계 인버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 계통연계 인버터는 PWM 동작으로 인하여 스위칭 주파수(2~15 kHz)와 인근 주파수에 고조파를 발생시킨다. 이 고조파 성분들은 계통연계시 계통에 연결된 다른 부하에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 IEEE-1547<sup>[1]</sup> 규정등에 의해 고조파를 제한하고 있다. 고조파 저감을 위하여 기존 L필터보다 저가격과 작은 부피로 고조파를 효율적으로 저감시킬 수 있는 LCL필터가 많이 사용되고 있다<sup>[3,4]</sup>.

Paper number: TKPE-2013-18-1-12 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

<sup>1</sup> Dept. of Control & Instrumentation Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Manuscript received Sep. 14, 2012; accepted Dec. 11, 2012

LCL필터설계 시 계통전류 고조파 감쇠율등 필터성능은 유지하면서 인덕턴스와 캐패시턴스는 작게 설계하는 것이 중요하다<sup>[5]</sup>. 문헌[6]에서는 총 인덕턴스, 커패시턴스 및 공진주파수에 관한 가이드라인과 LCL필터 모델링에 의한 필터설계 방법을 제안하였고, 문헌[7]에는 최대 전류리플에 대한 전체 인덕턴스 값을 선정하여 LCL필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 기존 LCL필터 설계 기법<sup>[4-7]</sup>은 LCL필터 설계 시 제안하는 설계식으로부터 필터를 설계한 후, 수식 계산을 통하여 설계조건을 만족하지 않으면 다시 설계하는 시행착오 방법으로 LCL필터를 설계한다. 따라서 필터설계시에 반복적인 수식계산이 필요하며, 설계조건을 만족하는 필터값이 존재하지 않더라도 기존 설계방법으로는 필터값이 존재하는지 알 수 없다. 또한, 설계조건을 만족하는 필터값이 존재하더라도 설계된 필터값이 최적의 필터값인지 알 수 없다.

최근 LCL필터 설계시 최적의 값을 구하기 위해 최적 기법<sup>[9]</sup>을 적용한 방법이 연구되었다<sup>[8]</sup>. 하지만 계통전류 고조파 저감만을 목적으로 설계<sup>[4-8]</sup>되었기 때문에 그림 1과 같이 중요부하(예를들어 연료전지 시스템의 BOP)에도 동시에 전력을 공급해야 하는 시스템에서는 중요부하의 전압리플이 고려되지 않아 중요부하의 품질이 저하될 수 있고, 잘못된 필터 설계로 인해 시스템의 성능 저하와 가격증가를 부를 수 있다.

본 논문에서는 LCL필터 모델링을 통하여 LCL필터 설계식<sup>[10]</sup>과 설계조건 만족여부를 직관적으로 알 수 있도록 설계 영역식을 각각 구하고, 중요부하가 존재할 때에도 중요부하의 전압리플율과 정격전력을 고려한 LCL필터 설계기법을 제안한다. 또한, 설계조건을 만족하는 LCL필터 설계 영역 내에서 중요부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 밴드위스에 가중치를 적용하여 LCL필터를 최적 설계한 방법을 제안하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증한다.<sup>[11]</sup>

2. 제안하는 LCL필터 최적 설계기법

2.1 LCL필터 설계식

그림 1과 같은 인버터 시스템에서 정격 전력( $P$ ), 입력 전압( $V_{dc}$ ), 스위칭 주파수( $f_{sw}$ )일 때, 3상 인버터 전력관계식으로부터 인버터 기본과 출력전류는

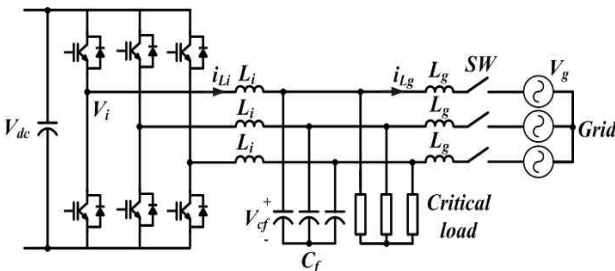


Fig. 1 Utility-interactive inverter with critical load

$$I_{Li,1} = \frac{P}{3V_{Cf,1}} \tag{1}$$

과 같고, 인덕터의 전압-전류 관계식으로부터  $i_{Li}$ 의 스위칭 성분  $I_{Li,sw}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_{Li,sw} = \frac{V_{i,sw}}{\omega_{sw}L_i} \tag{2}$$

여기서  $\omega_{sw} = 2\pi f_{sw}$ 이고, SPWM을 사용하고 스위칭 주파수가 라인주파수에 비해 매우 크다고 가정하면  $V_{i,sw}$ 는 다음과 같다.<sup>[12]</sup>

$$V_{i,sw} = m_{a,sw} \cdot 0.5 V_{dc} / \sqrt{2} \tag{3}$$

인버터는 PWM동작으로 인하여 고조파 성분 중 스위칭주파수 성분이 제일 많이 포함되고, 스위칭주파수 크기는 스위칭 주파수에 관계없이 기본과 크기를 나타내는 기본과 진폭변조지수에 따라 결정된다. 표 1은 기본과 진폭변조지수에 따른 스위칭 주파수 진폭변조지수를 나타낸 표이다.<sup>[12]</sup>

Table 1 Switching frequency modulation index ( $m_{a,sw}$ ) according to fundamental frequency modulation index ( $m_a$ )

$m_a$	$m_{a,sw}$
0.2	1.242
0.4	1.15
0.6	1.006
0.8	0.818
1.0	0.601

식(2)에 식(3)을 대입하고, 식(1)과  $r_{Li}$ 를 이용하여  $I_{Li,sw}$ 을 대입하여  $L_i$  설계식을 구하면 다음과 같다.

$$L_i = \frac{3m_{a,sw} \cdot V_{dc} \cdot V_{Cf,1}}{2\sqrt{2}\omega_{sw} \cdot r_{Li} \cdot P} \tag{4}$$

그림 2는 계통연계시 LCL필터 모델을 나타낸 그림이고, 그림 3은 독립운전시 LC필터 모델을 나타낸 그림이다.

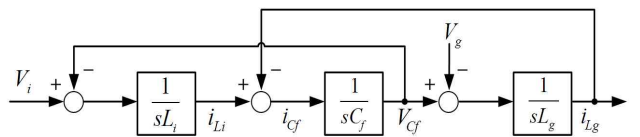


Fig. 2 LCL filter model(grid-connected mode)

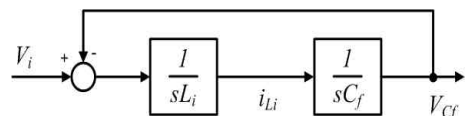


Fig. 3 LC filter model(stand-alone mode)

그림 2와 그림 3으로부터 계통연계시와 독립운전시 스위칭 주파수에서  $V_i$ 에 대한  $V_{Cf}$ 의 전달함수를 각각 구하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{Cf,sw}}{V_{i,sw}} = \frac{1}{w_{sw}^2 C_f L_i + 1 + (L_i/L_g)} \quad (5)$$

$$\frac{V_{Cf,sw}}{V_{i,sw}} = \frac{1}{w_{sw}^2 C_f L_i + 1} \quad (6)$$

식(5)는 계통연계시, (6)은 독립운전시의 전달함수로 계통연계시가 독립운전시보다 고조파가 더 크게 감쇠하는 것을 알 수 있다. 따라서  $r_{Cf}$ 는 계통연계시와 독립운전시 항상 만족해야 하므로 고조파 감쇠가 적은 독립운전시의 전달함수를 이용하여  $C_f$ 를 설계하여야 한다. 따라서 식(6)에 식(3),(4), $r_{Cf}$ 를 대입하여  $C_f$ 설계식을 구할 수 있다.

$$C_f = \frac{P \cdot r_{Li} \cdot A}{3V_{Cf,1}^2 \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}} \quad (7)$$

여기서  $A = V_{dc} - (2\sqrt{2}/m_{a,sw}) \cdot V_{Cf,1} \cdot r_{Cf}$ .

그림 2를 이용하여 스위칭 주파수에서  $I_{Li,sw}$ 에 대한  $I_{Lg,sw}$ 의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{I_{Lg,sw}}{I_{Li,sw}} = \frac{1}{w_{sw}^2 L_g C_f + 1} \quad (8)$$

식 (8)에 식(7),  $r_{Li}$ ,  $r_{Lg}$ ,  $P_r$ 을 대입하여 최종적으로  $L_g$  설계식을 구할 수 있다.

$$L_g = \frac{3V_{Cf,1}^2 \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf} (r_{Li} \cdot P_r^{-1} - r_{Lg})}{\omega_{sw} \cdot P \cdot r_{Li} \cdot r_{Lg} \cdot A} \quad (9)$$

$L_i$ ,  $C_f$ ,  $L_g$  설계값은 식(4), (7), (9)로부터 구할 수 있다. 설계식에서 인버터 사양에 따라 결정되는 값( $P$ ,  $\omega_{sw}$ ,  $V_{dc}$ 등)을 제외하면  $r_{Cf}$ 와  $r_{Li}$  값에 따라 필터값이 다르게 설계된다. 필터 설계시 만족해야 하는 설계조건을  $r_{Cf}$ 와  $r_{Li}$  영역식으로 구하여 영역내에서  $r_{Cf}$ 와  $r_{Li}$  값을 선정하면 설계조건을 만족하는 LCL필터를 설계할 수 있다.

### 2.2 설계조건을 만족하는 LCL필터 설계 영역

필터 설계시 설계조건으로 전체 인덕턴스( $L_t = L_i + L_g$ ), 캐패시턴스( $C_f$ ), 필터 공진주파수( $\omega_{res}$ )를 제한한다.<sup>[6]</sup>

전체 인덕턴스( $L_t = L_i + L_g$ )의 설계조건은

$$L_i + L_g \leq K_{Lb} \cdot L_b \quad (10)$$

이고, 식(4), (9), 베이스값을 대입하여 식(10)을 만족하는  $r_{Li}$  영역을 구할 수 있다.

$$r_{Li} \geq \frac{m_{a,sw} \cdot V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot P_r \cdot r_{Lg} (2A - V_{dc})}{2\sqrt{2} V_{Cf,1} (\omega_{sw} \cdot K_{Lb} \cdot P_r \cdot r_{Lg} \cdot A - V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Cf})} \quad (11)$$

커패시턴스( $C_f$ )의 설계조건은

$$C_f \leq K_{Cb} \cdot C_b \quad (12)$$

이고, 식(7), 베이스값을 대입하여 식(12)를 만족하는  $r_{Li}$  영역을 구할 수 있다.

$$r_{Li} \leq \frac{K_{Cb} \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}}{\omega_1 \cdot A} \quad (13)$$

필터 공진주파수( $\omega_{res}$ )의 설계조건은

$$K_{\omega 1} \cdot \omega_1 \leq \omega_{res} \leq K_{sw} \cdot \omega_{sw} \quad (14)$$

이고, 식(4), (7), (9), LCL필터 공진주파수, 베이스값을 대입하여 식(14)를 만족하는  $r_{Li}$  영역을 식(15)로 구할 수 있다. 따라서 필터 설계조건인 식(10), (12), (14)를 만족하는 LCL필터 설계값은 식(11), (13), (15)를 만족하는  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$  영역으로부터 구할 수 있으며, LCL필터 설계영역은 그림 4와 같다.

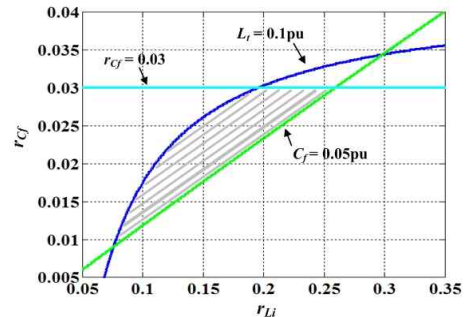


Fig. 4 Region of  $r_{Li}$  and  $r_{Cf}$  satisfying design guideline in [6]

그림 4는 스위칭주파수를 10kHz,  $r_{Lg}=0.003$ ,  $r_{Cf} \leq 0.03$  (IEEE std 519<sup>[2]</sup>규정을 적용),  $K_{Lb}=0.1$ ,  $K_{Cb}=0.05$ ,  $K_{\omega 1}=10$ ,  $K_{sw}=0.5$ 로 필터를 설계한 경우 위의 설계조건을 만족하는  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 의 영역을 나타내며, 설계조건인 식(10), (12), (14)를 모두 만족하는 영역이다. 설계조건을 만족하는 영역내에는 무수히 많은 해가 존재하므로 최적 필터값을 얻기 위한 최적설계가 필요하다.

$$\frac{P_r \cdot r_{Lg} (2A - V_{dc} + K_{sw}^2 \cdot A)}{A(K_{sw}^2 + 1) - V_{dc}} \leq r_{Li} \leq \frac{P_r \cdot r_{Lg} [\omega_{sw}^2 (2A - V_{dc}) + K_{\omega 1}^2 \cdot \omega_1^2 \cdot A]}{K_{\omega 1}^2 \cdot \omega_1^2 \cdot A - \omega_{sw}^2 (V_{dc} - A)} \quad (15)$$

2.3 가중치 부여방법을 적용한 최적설계 기법

그림 4에서 표현된 필터설계 영역안에서  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 를 선정하면 LCL필터값은 설계 조건을 만족할 수 있다. 하지만 설계조건을 만족하는 LCL필터 조합은 무수히 많을 수 있으며, 설계된 LCL필터 조합에 따라서 설계되는 총 인덕턴스와 캐패시턴스가 차이가 날 수 있다(그림 4에서 설계 사양인 경우,  $L_t$ 는  $\Delta 0.02P.U$ ,  $C_f$ 는  $\Delta 0.02P.U$ , 공진주파수 1.8kHz~2.2kHz). 따라서 필터 설계 조건식(10), (12), (14)를 만족하는 영역안에서 시스템에서 요구되는 항목을 고려하여 평가항목을 선정하고 사용자의 중요도에 따라 가중치를 부여하여 최적 LCL필터를 설계한다.

가중치를 부여한 최적필터 설계평가 항목은 다음과 같다.

- E1 :  $L_t$ (인덕터 부피)  $E_1 = \frac{L_t}{K_{Lb} \cdot L_b}$
- E2 :  $C_f$ (무효전류량)  $E_2 = \frac{C_f}{K_{Cb} \cdot C_b}$
- E3 :  $r_{Cf}$ (중요부하 전압품질)  $E_3 = \frac{r_{Cf}}{r_{Cf,max}}$
- E4 :  $\omega_{res}$ (시스템 대역폭)  $E_4 = \frac{K_{\omega 1} \cdot \omega_1}{\omega_{res}}$

위의 각 평가기준에 따라 가중치  $\lambda$ 를 고려한 평가식은

$$Eval = E_1 \cdot \lambda_1 + E_2 \cdot \lambda_2 + E_3 \cdot \lambda_3 + E_4 \cdot \lambda_4 \quad (16)$$

이다(단, 평가항목은 사용자에게 따라 다르게 선정할 수 있다). 위 식의 결과값인  $Eval$ 이 조건에 따라 최대 또는 최소가 되는  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 로부터 최적 필터값을 구할 수 있으며 최적 필터값은 각 평가기준에 부여되는 가중치( $\lambda$ )에 따라 달라질 수 있다. 그림 5는 제안하는 LCL필터 최적설계기법을 나타낸 설계 순서도이다.

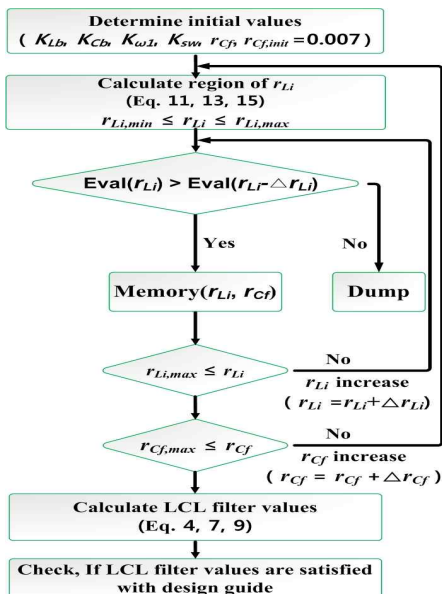


Fig. 5 Flow chart for the proposed optimized LCL filter design

Table 2 Inverter system specification

Rated inverter output power( $P$ )	4kW
Rated critical load power( $P_l$ )	500W
Grid line-to-line voltage( $V_{LL}$ )	220V
DC-link voltage( $V_{dc}$ )	450V
Grid frequency( $f_g$ )	60Hz
Switching frequency( $f_{sw}$ )	10kHz
Ripple rate of grid current ( $r_{Lg}$ )	0.003

Table 3 Weighting factors imposed by user

Weighting factor( $\lambda$ )	Case 1	Case 2
$L_t(\lambda_1)$	0.5	0.2
$C_f(\lambda_2)$	0.25	0.6
$r_{Cf}(\lambda_3)$	0.1	0.1
$\omega_{res}(\lambda_4)$	0.15	0.1

2.4 설계 예

표 2는 설계 예로 주어진 인버터 시스템 사양표이다. 설계 예를 통한 제안하는 LCL필터 최적설계 과정은 다음과 같다.

STEP 1. 초기값 선정

초기값으로 설계조건 항목( $K_{Lb}, K_{Cb}, K_{\omega 1}, K_{sw}$ ),  $r_{Cf}$  최대값,  $r_{Lg}$ 를 선정한다. 일반적으로 총 인덕터 부피와 인덕터에 의한 전압강하를 고려하여  $K_{Lb}$ 는 0.1, 캐패시터로 흐르는 무효전류를 고려하여  $K_{Cb}$ 는 0.05, 시스템 밴드width를 고려하여  $K_{\omega 1}$ 는 10,  $K_{sw}$ 는 0.5로 선정한다. 또한, IEEE1547<sup>[1]</sup>규정에 따라  $r_{Lg}$ 는 0.003으로 선정하고,  $r_{Cf}$ 는 IEEE519<sup>[2]</sup>규정을 적용하여 0.03이하로 선정한다. (여기서  $r_{Cf,init}$ 은  $r_{Cf}$ 초기값)

STEP 2. 설계조건을 만족하는  $r_{Li}$ 의 영역 계산

필터 설계조건 영역 계산식(11), (13), (15)로부터  $r_{Li}$ 의 영역을 구한다. 예를 들어 표2에 주어진 인버터 시스템 사양에  $r_{Cf}$ 를 0.02로 가정하면, 식(11), (13), (15)의 결과로부터 설계조건을 만족하는  $r_{Li}$ 영역( $0.1127 \leq r_{Li} \leq 0.17$ )을 구할 수 있다.

STEP 3. 가중치 부여 방식을 적용한 최적 설계값 도출

STEP 2에서 구한  $r_{Li}$ 영역 안에서  $r_{Li}$ 를 적절히 증가( $\Delta r_{Li}$ )시켜가며 평가점수( $Eval$ )를 계산하고, 현재값( $r_{Li}$ )과 이전값( $r_{Li} - \Delta r_{Li}$ )을 비교하여 평가점수가 높은  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 를 저장한다. 평가점수는 사용자가 중요도에 따라 부여되는 가중치  $\lambda$ 에 따라 최종 선정되는  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 가 달

Table 4 Finally determined values of  $r_{Li}$  and  $r_{Cf}$

	$r_{Li}$	$r_{Cf}$
Case 1	0.123	0.0162
Case 2	0.11	0.02

Table 5 Optimum values of LCL filters

	$L_i$	$L_g$	$L_t$	$C_f$
Case 1	1.6mH	1.2mH	2.8mH	9.7uF
Case 2	1.78mH	1.44mH	3.22mH	7uF

Table 6 Filter design guideline and optimum values of LCL filters

	$L_{t,pu}$	$C_{f,pu}$	$f_{res}(kHz)$
Design guideline	$\leq 0.1$	$\leq 0.05$	$0.6 \leq f_{res} \leq 5$
Case 1	0.086	0.045	1.96
Case 2	0.1	0.032	2.12

라질 수 있다. 예를 들기 위해 표 3과 같이 총 인덕턴스에 가중치를 크게 부과한 경우(Case 1)과 필터 캐패시터에 가중치를 크게 부과한 경우(Case 2)로 나눠 가중치를 다르게 선정하였다.

현재값( $r_{Li}$ )이 설계 영역의 최대값( $r_{Li,max}$ )보다 같거나 클 경우  $r_{Cf}$ 를 증가하고, STEP2를 반복한다.  $r_{Cf}$ 가  $r_{Cf,max}$ 보다 같거나 클 경우 STEP 4로 이동한다.

**STEP 4. 최종 선정된  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 로부터 LCL필터값 계산**

최종 선정된  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 는 표 4와 같고, 두 파라미터를 LCL필터 설계식(4), (7), (9)에 대입하여 최적 설계된 LCL필터값은 표 5와 같다.

표 5에서 Case 1(총 인덕턴스가 작게 설계되도록 가중치를 크게 부과한 경우)의 총 인덕턴스값(2.8mH)이 Case 2(필터 캐패시터에 가중치를 크게 부과한 경우)의 총 인덕턴스값(3.22mH)보다 작게 설계된 것을 알 수 있고, 필터 캐패시터는 Case 2(7uF)가 Case 1(9.7uF)보다 작게 설계된 것을 알 수 있다. 이는 Case 1과 Case 2에 적용한 가중치에 따라 다르게 나타난 것으로 주어진 시스템에서 사용자가 중요도에 따라 가중치를 적용하여 최적설계를 할 수 있다.

**STEP 5. 설계조건 만족여부 확인**

선정된 LCL필터값이 설계조건을 만족하는지 확인한다. 표 6에서 알 수 있듯이 Case 1과 Case 2 경우 둘 다 설계조건을 만족하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 6은 설계조건을 만족하는  $r_{Li}$ 와  $r_{Cf}$ 의 영역과 두 경우의 가중치에 따른 최적 필터값을 나타낸 그림이다.

최적필터값은 설계자가 부여한 가중치에 따라  $r_{Lg}$ 는 계통규정을 만족하면서 최적설계 필터값은 다르게 설계될 수 있다.

**3. 실험결과**

계통연계 인버터 시스템의 실험을 위한 실험 구성도는 그림 7과 같다. 인버터의 IGBT는 세미크론사의 SKM75GB128D를 사용하였고, DSP(TMS320F28335) 프로세서와 센싱회로로 구성된 통합 제어보드를 구성하였다.

실험에서 사용한 인버터 사양은 표 2와 같고, 계산된 LCL필터 값은 표 5를 이용하였다. 그림 9는 계통연계시  $v_{Cf}$ ,  $i_{Lg}$ ,  $i_{Li}$  각 파형이다. 인버터에서 총 4kW의 전력을 생산하여 계통에 3.5kW, 부하에 500W를 공급하고 있다. 계통전류의 THD는 5%이내이다.

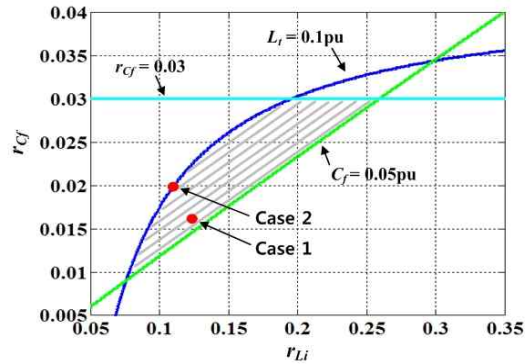


Fig. 6 Region of  $r_{Li}$  and  $r_{Cf}$  satisfying design guideline and optimized design point

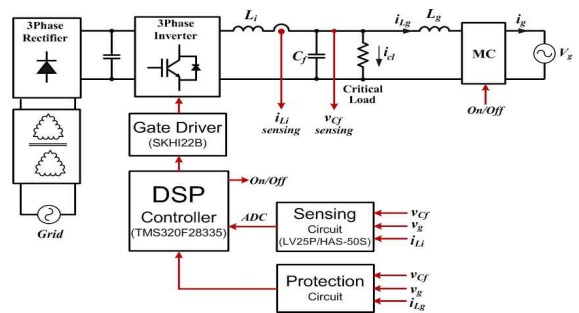


Fig. 7 Block diagram of experimental setup

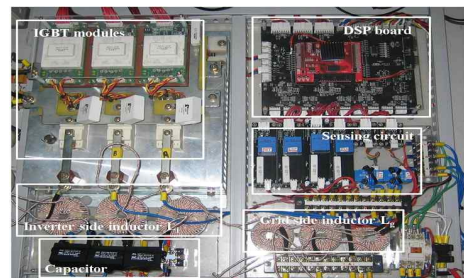


Fig. 8 Photograph of the laboratory prototype

그림 10은 계통연계시  $i_{Li}$  FFT파형으로 각 측정값( $r_{Li}$ )은 Case 1은 0.118(설계목표값:0.123), Case 2는 0.108(설계목표값:0.11)이고, 그림 11은  $i_{Lg}$  FFT파형으로 각 측정값( $r_{Lg}$ )은 Case 1은 0.0025(설계목표값:0.003), Case 2는 0.002(설계목표값:0.003)로 설계목표를 만족하는 것을 알 수 있다.

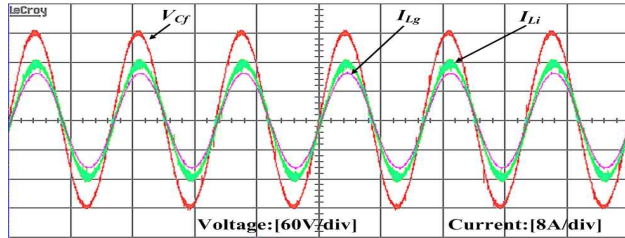


Fig. 9 Waveform of voltage across the critical load and grid-side current, inverter-side current for grid-connected operation

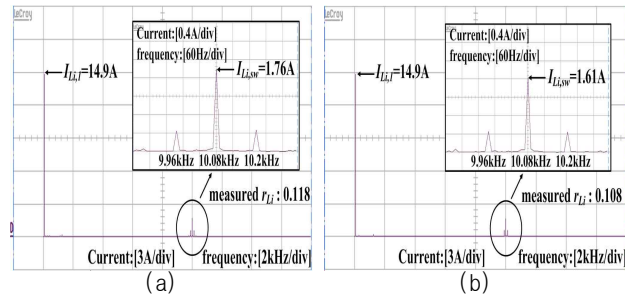


Fig. 10 FFT of inverter-side current  $i_{Li}$  (a) Case 1 (b) Case 2

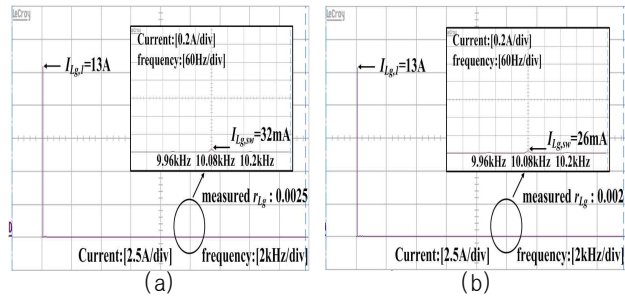


Fig. 11 FFT of grid-side current  $i_{Lg}$  (a) Case 1 (b) Case 2

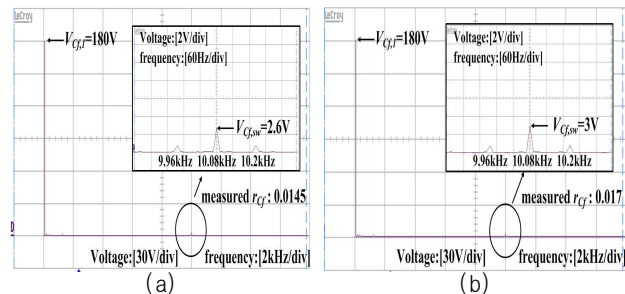


Fig. 12 FFT of voltage  $v_{Cr}$  across the critical load(grid connected mode) (a) Case 1 (b) Case 2

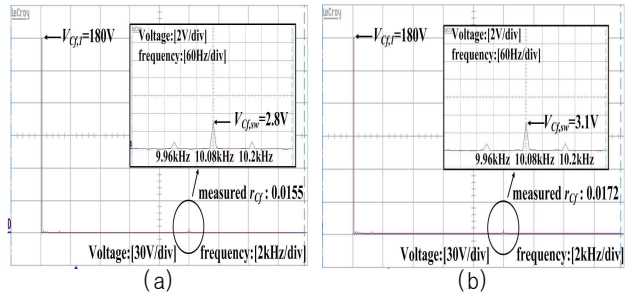


Fig. 13 FFT of voltage  $v_{Cr}$  across the critical load(stand alone mode) (a) Case 1 (b) Case 2

Table 7 Summary of experimental result

		Measured(calculated)	
		Case 1	Case 2
$r_{Li}$ (Grid-connected mode)		0.118(0.123)	0.108(0.11)
$r_{Lg}$ (Grid-connected mode)		0.0025(0.003)	0.002(0.003)
$r_{Cr}$	Grid-connected mode	0.0145(0.0162)	0.017(0.02)
	Stand-alone mode	0.0155(0.0162)	0.0172(0.02)

그림 12는 계통연계시 부하 상전압 FFT파형으로 Case 1은 0.0145(설계목표값:0.0162), Case 2는 0.017(설계목표값:0.02)이고, 그림 13은 독립운전시 부하 상전압 FFT파형으로 Case 1은 0.0155(설계목표값:0.0162), Case 2는 0.0172(설계목표값:0.02)로 모드에 상관없이 항상  $r_{Cr} \leq 0.03$  를 만족하는 것을 알 수 있다.

표 7은 수식에 의해 계산된 이론값(calculated values)과 실험을 통해 측정된 값(measured values)을 정리한 실험 결과표이다. 위의 표에서 실제 사용된 LCL필터의 공차가 있지만, 모든 측정값이 이론값 제한치 안에 포함되므로 설계조건을 만족한다.

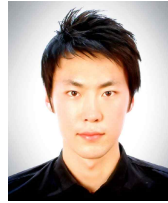
### 4. 결 론

본 논문에서는 중요부하가 존재하는 계통연계 시스템에서 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 중요부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 밴드위스에 가중치를 적용하여 LCL필터 최적 설계기법을 설계 예를 통해서 단계적으로 제안하였다. 그리고 설계조건을 만족하는 LCL필터 설계영역을  $r_{Li}$ 와  $r_{Cr}$ 의 영역으로 나타내어 분석하였고, 시행착오 없는 직관적인 설계방법을 제안하였다. 제안하는 최적설계 기법으로 실험을 진행하였으며, 타당성을 증명하였다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.2-2008.
- [2] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992.
- [3] I.J. Gabe, V.F.Montagner, and H. Pinheiro, "Design and implementation of a robust current controller for VSI connected to the grid through an LCL filter," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1444-1452, Jun. 2009
- [4] D. Xu, L. Cao, and X. Zhu, "An Improved Control Strategy for Grid-Connected Voltage Source Inverters With an LCL Filter," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 23, No. 7, pp. 1899-1906, July. 2008
- [5] T. Wang, Z. Ye, G. Sinha, and X. Yuan, "Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter," in Proc. *IEEE PESC*, Vol. 2, pp. 779-784, 2003.
- [6] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter based active rectifier" , *IEEE Ind. Applicat.*, Vol. 1, pp. 297-307, Oct. 2001.
- [7] J. Park, M. Chi, H. Kim, T. Chun, and E. Nho, "LCL filter Design for Grid-connected PCS Using Total Harmonic Distortion and Ripple Attenuation Factor," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics* Vol. 15, No. 3, pp. 235-243, July 2010.
- [8] B. Cho, S. Sul, H. Yoo, and S. Lee, "LCL Filter Design and Control for Grid-connected PWM Converter," *IEEE ECCE2011*, pp. 756-763.
- [9] M. Liserre, A. Dell'Aquila, and F. Blaabjerg, "Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 19, No. 1, pp. 76-86, Jan. 2004.
- [10] J. Kwon, S. Yoon, S. Choi, "Indirect Current Control for Seamless Transfer of Three-Phase Utility Interactive Inverters," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 27, No. 2, pp. 773-781, Feb. 2012.
- [11] S. Jung, Y. Kim, H. Oh, S. Choi, "Optimized LCL filter Design of Utility Interactive Inverter Considering Voltage Quality of Local Load," *2011 Power Electronics Annual Conference*, pp. 65-66.
- [12] N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd" ed. New York: Wiley, 1995.

**정상혁(鄭相赫)**

1985년 1월 20일생. 2011년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.

**최세완(崔世琬)**

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 재무이사.