

# 독립부하의 전압품질을 고려한 계통연계 인버터의 LCL필터 최적설계

정상혁, 김영우, 오형민, 최세완  
서울과학기술대학교

## Optimized LCL filter Design of Utility Interactive Inverter Considering Voltage Quality of Local Load

SangHyuk Jung, Youngwoo Kim, Hyungmin Oh, Sewan Choi  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

기존 LCL필터 설계기법은 계통에 주입되는 전류의 고조파 저감만을 고려하였으나, 연료전지 시스템과 같이 독립부하가 존재하는 경우, 독립부하의 전압 품질을 보장할 수 있는 필터 설계가 이루어져야 한다. 또한 필터성능은 유지하면서 인덕턴스와 캐패시턴스는 작게 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서 계통전류의 고조파 기준은 만족하면서 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 밴드위스를 고려한 LCL필터 설계방법을 제안한다.

### 1. 서론

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 IEEE1547<sup>[1]</sup> 규정에 의해 고조파를 제한하고 있다<sup>[3]</sup>. 고조파 저감을 위하여 부피는 작고 동특성이 우수한 LCL필터가 많이 사용되고 있다. 문헌[3]에서 총 인덕턴스, 커패시턴스 및 공진주파수에 관한 가이드라인과 LCL필터 모델링에 의한 필터 설계 방법을 제안하였고, 문헌[4]에는 최대 전류리플에 대한 전체 인덕턴스 값을 선정하여 LCL필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 그러나 기존 필터설계 방법들<sup>[3,4]</sup>은 계통전류 고조파 저감만을 목적으로 설계되었기 때문에 그림 1과 같이 독립부하(예를들어 연료전지 시스템의 BOP)에도 동시에 전력을 공급해야 하는 시스템에서는 독립부하의 전압리플이 고려되지 않아 독립부하의 품질이 저하될 수 있다. 또한 필터설계 시 고조파 감쇠율 등 필터성능은 유지하면서 인덕턴스와 캐패시턴스는 작게 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 계통전류의 고조파 기준은 만족하면서 독립부하 전압리플, 인덕터부피, 무효전류량, 시스템 밴드위스에 가중치를 적용하여 LCL필터를 설계하는 방법을 제안하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증한다.

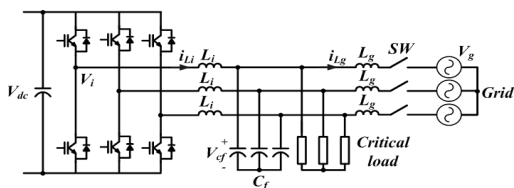


그림 1. 독립부하가 존재하는 3상 계통연계 인버터

### 2. 제안하는 LCL필터 설계

각 필터값  $L_i$ ,  $C_f$ ,  $L_g$  식은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$L_i = \frac{0.868 \cdot V_{dc} \cdot V_g}{\omega_{sw} \cdot a \cdot P} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{P(a-x)(1-r)}{0.868 \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot V_g \cdot r} \quad (2)$$

$$L_g = \frac{0.868 \cdot V_{dc} \cdot V_g \cdot r}{\omega_{sw} (1-r) \cdot x \cdot P} \quad (3)$$

여기서  $a = I_{L_i,sw}/I_{L_i,l}$ ,  $b = I_{L_g,sw}/I_{L_i,sw}$ ,  $x = I_{L_g,sw}/I_{L_i,l} = a \cdot b$ ,  $r = V_{C_f,sw}/V_{i,sw}$  임

SPWM( $m_a=0.8$ )을 사용하고 스위칭 주파수가 라인주파수에 비해 매우 크다고 가정하면  $V_{i,sw}$ 은 다음과 같다.<sup>[6]</sup>

$$V_{i,sw} = \frac{0.818 \cdot V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (4)$$

또한, 식(4)를 이용하여  $d = V_{C_f,sw}/V_{C_f,l}$ 를 만족하는  $r$ 은 다음과 같다.

$$r = \frac{3.458 \cdot V_g \cdot d}{V_{dc}} \quad (5)$$

여기서  $V_g \approx V_{C_f,l}$  임

LCL필터 설계시 전체 인덕턴스( $L_t$ )의 제한조건은<sup>[3]</sup>

$$L_t \leq 0.1L_b \quad (6)$$

이고, 식(1),(3),  $L_t = L_i + L_g$ ,  $L_b = Z_b/\omega_l$ ,  $Z_b = V_{LL}^2/P$ 를 대입하여 식(6)을 만족하는  $a$ 를 구할 수 있다.

$$a \geq \frac{V_{dc} \cdot \omega_l \cdot x(r-1)}{0.346 \cdot V_g \cdot \omega_{sw} \cdot x(r-1) + V_{dc} \cdot \omega_l \cdot r} \quad (7)$$

커패시턴스( $C_f$ )의 제한조건

$$C_f \leq 0.05C_b \quad (8)$$

에 식(2),  $C_b = (\omega_l \cdot Z_b)^j$ 를 대입하여 식(8)를 만족하는  $a$ 는

$$a \leq \frac{0.0145\omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r}{\omega_l \cdot V_g \cdot (1-r)} + x \quad (9)$$

이고, 공진주파수( $\omega_{res}$ )의 제한조건

$$\frac{\omega_{sw}}{2} \geq \omega_{res} \geq 10\omega_l \quad (10)$$

에  $\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}}$ , 식(1),(2),(3)을 대입하여 식(10)을 만족하는  $a$ 는 다음과 같다.

$$\frac{1.25(1-r)x}{0.25(1-r)-r} \leq a \leq \frac{x(1-r)(\omega_{sw}^2 + 100\omega_l^2)}{100\omega_l^2(1-r) - \omega_{sw}^2 \cdot r} \quad (11)$$

따라서 제한조건 (6),(8),(10)을 만족하는 LCL필터 설계값은 식(7),(9),(11)에서  $a$ 와  $r$ 의 영역으로부터 구할 수 있으며 그림 2와 같다.

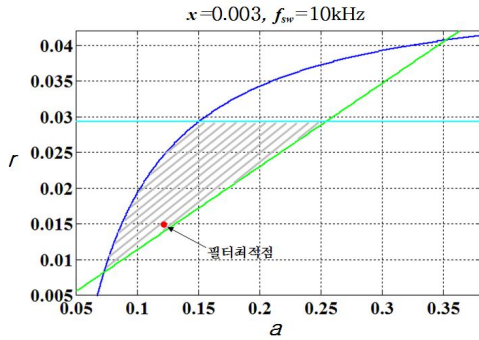


그림 2. 설계조건을 만족하는  $a$ 와  $r$ 의 영역과 필터최적점

그림 2는 스위칭주파수를 10kHz,  $x=0.003$ ,  $d<0.03$  (IEEE519<sup>[2]</sup>규정을 적용)로 필터를 설계한 경우 위의 설계조건을 만족하는  $a$ 와  $r$ 의 영역을 나타낸다. 이 영역내에서 아래의 각 성능에 가중치를 두어 최적의 LCL필터 값을 구한다.

- $E_1$  : 총 인덕턴스  $L_t$ (LCL필터 부피)
- $E_2$  : 필터 커패시턴스  $C_f$ (무효전류량)
- $E_3$  : 독립부하 전압리플을  $d$ (독립부하 전압품질)
- $E_4$  : 공진주파수  $\omega_{res}$ (시스템 밴드위스)

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

$$Evaluation = E_1 \cdot \lambda_1 + E_2 \cdot \lambda_2 + E_3 \cdot \lambda_3 + E_4 \cdot \lambda_4$$

이며, 위 식의 결과값인  $Evaluation$ 이 조건에 따라 최대 또는 최소가 되는  $a$ 와  $r$ 로부터 최적의 필터값을 구할 수 있다.

### 3. 실험 결과

제한한 3상 LCL필터 최적설계의 타당성을 입증하기 위하여 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 시스템 파라미터는

- $P = 1kW$     ·  $V_{LL} = 110V$     ·  $f_{sw} = 10kHz$     ·  $x = 0.003$
- $\lambda_1 = 0.5$     ·  $\lambda_2 = 0.25$     ·  $\lambda_3 = 0.17$     ·  $\lambda_4 = 0.08$

이고, 위의 조건으로부터 계산된 LCL필터 값은 다음과 같다.

- $L_i = 1.6mH$     ·  $C_f = 10.2\mu F$     ·  $L_g = 1mH$
- $a = 0.1227$     ·  $r = 0.0149$     ·  $d = 0.0152$

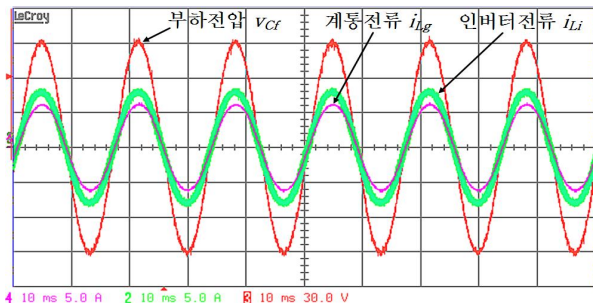


그림 3. 계통연계 시 부하전압 및 계통전류, 인버터전류 파형

그림 3은 계통연계시 부하전압 $V_{CF}$ , 계통전류 $i_{Lg}$ , 인버터전류 $i_{Li}$  각 파형이고, 계통전류의 THD는 5%이내이다. 인버터전류 기본파에 대한 계통전류 스위칭성분( $x$ ) 측정값은 0.0022(설계목표값:0.003), 독립부하의 양단전압 기본파에 대한 스위칭성분( $d$ ) 측정값은 0.0133(설계목표값:0.0152)로 설계목표를 만족한다.

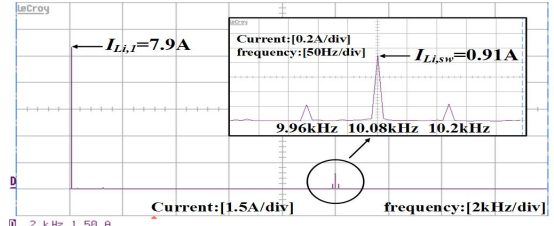


그림 4. 인버터전류( $i_{Li}$ ) FFT

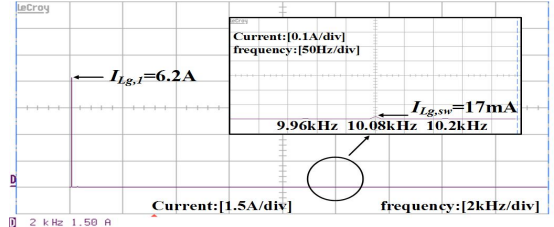


그림 5. 계통전류( $i_{Lg}$ ) FFT

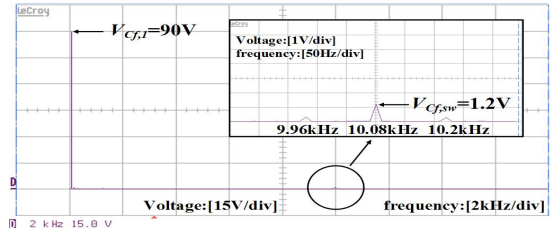


그림 6. 부하전압( $V_{CF}$ ) FFT

### 4. 결론

본 논문에서는 독립부하가 존재하는 계통연계 시스템에서 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 밴드위스에 가중치를 적용하여 LCL필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 그리고 설계조건을 만족하는 LCL설계영역을  $a$ 와  $r$ 의 영역으로 나타내고, 분석하였다. 제안하는 최적설계방법으로 실험을 진행하였으며, 타당성을 증명하였다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(20101020300260) 주관으로 수행된 과제임.

### 참고 문헌

- [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] 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.
- [4] Yongqiang Lang, Dianguo Xu, Hadianamrei S.R. and Hongfei Ma, "A Novel design method of LCL type utility interface for three phase voltage source rectifier", in *Proc. IEEE PESC '05* 36th, pp. 313-317, 2005, June.
- [5] 윤선재, 오형민, 최세완, "독립부하의 전압품질을 고려한 계통연계형 PCS의 LCL필터 설계기법", 전력전자학회 2010년도 추계학술대회 논문집 2010.11, pp. 38-39
- [6] N. Mohan, W. P. Robbins, and T. Undeland, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd" ed." New York: Wiley, 1995.