

# 독립부하의 전압품질을 고려한 계통연계형 PCS의 LCL필터 설계기법

윤선재, 오형민, 최세완  
서울과학기술대학교

## Design Method of LCL Filter of Utility Interactive PCS Considering Voltage Quality of Local Load

Sunjae Yoon, Hyungmin Oh, Sewan Choi  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

태양광 및 풍력발전에서 계통연계 인버터의 LCL필터설계 시 계통에 주입되는 전류의 고조파 저감만을 고려하였으나 연료전지 발전과 같이 독립부하가 존재하는 경우, 이 같은 설계 기법을 적용 시 독립부하의 전압은 일정한 품질을 보장할 수 없다. 본 논문에서는 계통에 주입되는 전류 품질 뿐만 아니라 독립부하의 전압 품질도 고려한 LCL필터 설계방법을 제안한다.

### 1. 서론

분산발전 시스템을 계통과 연계 시 계통전류의 고조파는 IEEE1547<sup>[1]</sup> 규정에 의해 일정 값 이하로 제한되어야 한다. 이를 위해 부피가 작고 시스템 동특성이 우수한 LCL필터가 많이 사용되고 있다. 문헌 [2]에서는 필터설계 가이드라인을 제시하고 LCL필터 모델링에 의한 필터설계 방법을 제안하였으나 컨버터측 인덕터의 설계과정이 언급되지 않아 시행착오에 의한 설계 과정을 겪게 된다. 문헌[3]에서는 SVPWM에서의 최대 전류리플에 대한 전체 인덕턴스 값을 선정하는 방법을 제안하였고, 문헌[4]에서는 총고조파 왜율과 리플 감쇄율을 이용한 필터 설계방법을 제안하였다. 하지만 기존의 LCL필터 설계 방법들<sup>[2~6]</sup>은 계통에 주입되는 전류의 고조파를 일정 기준의 리플률 이하로 저감하기위한 목적으로 설계되었다. 그러나 그림 1과 같이 계통연계 시 BOP등 독립부하에도 동시에 전력을 공급해야 하는 연료전지 발전시스템에서 기존의 방법으로 커패시터의 무효전력만을 일정기준(예를 들면 5%) 이하로 제한하도록 설계 하는 경우 커패시터 고조파에 의한 전압리플은 고려되지 않아 커질 수 있으므로 독립부하의 전압 품질을 보장하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 계통에 주입되는 전류 품질 및 독립부하의 전압 품질도 고려한 LCL필터 설계방법을 제안하고 실험을 통해 그 타당성을 검증한다.

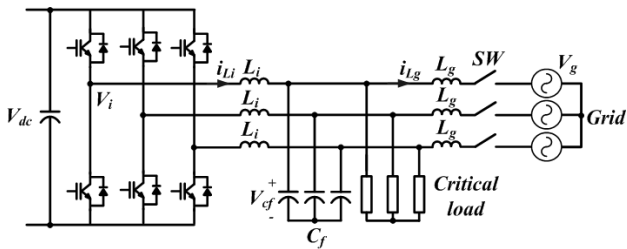


그림 1. 3상 계통 연계형 연료전지 발전시스템

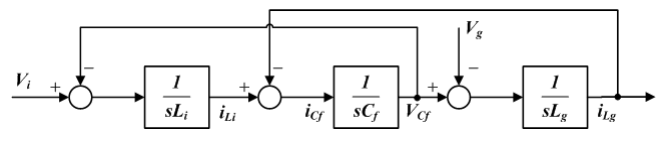


그림 2 LCL필터 모델

### 2. LCL필터 설계

그림 2의 LCL필터 모델을 이용하여 인버터 전류  $i_{Li}$ 에서 계통전류  $i_{Lg}$ 로의 전달함수를 구하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{I_{Lg}(s)}{I_{Li}(s)} = \frac{1}{L_g C_f s^2 + 1} \quad (1)$$

또한 인버터 출력 상전압  $V_i$ 에서 커패시터 전압  $V_{Cf}$ 로의 전달함수를 구하면 식(2)와 같다.<sup>[4]</sup>

$$\frac{V_{Cf}(s)}{V_i(s)} = \frac{L_g}{L_g C_f L_i s^2 + (L_g + L_i)} \quad (2)$$

주어진 인버터의 정격 전력( $P$ ), 출력전압( $V_{i,l} \approx V_{Cf,l}$ ), 입력전압( $V_{dc}$ ), 스위칭 주파수( $f_{sw}$ )에 대한 기본파 인버터 전류는

$$I_{Li,1} = \frac{P}{3V_{Cf,1}} \quad (3)$$

과 같고 계통전류( $I_{Lg}$ )의 고조파 리플률  $x$ 는

$$x \equiv \frac{I_{Lg,sw}}{I_{Li,1}} = a \times b \quad (3)$$

과 같이 정의된다. 여기서  $a = I_{Li,sw}/I_{Li,1}$ 는 인버터 전류( $I_{Li}$ )의 기본파에 대한 스위칭 성분의 비율이고,  $b = I_{Lg,sw}/I_{Li,1}$ 는 인버터 전류에 대한 계통 전류의 스위칭 성분 감쇄율이다.

$I_{Li}$ 의 스위칭 성분  $I_{Li,sw}$ 은

$$I_{Li,sw} = \frac{V_{i,sw}}{\omega_{sw} L_i}, \quad (\omega_{sw} = 2\pi f_{sw}) \quad (4)$$

와 같고 SPWM( $m_a=0.8$ )을 사용하고 스위칭 주파수가 라인 주파수에 비해 매우 크다고 가정하면  $V_{i,sw}$ 은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$V_{i,sw} = 0.818 \times 0.5 V_{dc} / \sqrt{2} \quad (5)$$

식(4),(5)를 이용하여  $L_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_i = \frac{0.818 \times 0.5 V_{dc} / \sqrt{2}}{\omega_{sw} \times a \times I_{Li,1}} \quad (6)$$

식(1)의 스위칭 성분만을 고려하면  $b$ 는 다음과 같다.

$$b = \frac{I_{Lg}(\omega_{sw})}{I_{Li}(\omega_{sw})} = \frac{1}{(\omega_{sw}^2 L_g C_f + 1)} \quad (7)$$

계통 측 인덕터  $L_g$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_g = \frac{\frac{1}{b} - 1}{\omega_{sw}^2 C_f} \quad (8)$$

식(2)의 스위칭 성분만 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{Cf}(\omega_{sw})}{V_i(\omega_{sw})} = \frac{L_g}{\omega_{sw}^2 L_g C_f L_i + (L_g + L_i)} \quad (9)$$

식(9)에 (8)을 대입하고  $V_{i,sw}$ 와  $V_{Cf,sw}$ 의 비율을  $r$ 로 정의하면

$$r \equiv \frac{V_{Cf}(\omega_{sw})}{V_i(\omega_{sw})} = \frac{(1-b)}{\omega_{sw}^2 C_f L_i + (1-b)} \quad (10)$$

식(10)으로부터  $C$ 필터 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_f = \frac{(1-b)(1-r)}{\omega_{sw}^2 L_i r} \approx \frac{(1-b)}{\omega_{sw}^2 L_i r} \quad (11)$$

여기서  $r$ 은 식(10)과 같이 정의되며, 필터설계 시 부하 전압(커패시터 전압)의 스위칭 리플 허용치에 맞게 설정해야 하는 값이다. 문헌 [2]의 필터설계 가이드라인에 따르면 총 인덕턴스는 0.1PU, 커패시턴스는 0.05PU, 공진주파수는 스위칭주파수의 1/2배를 넘지 않게 설계해야 하는데 요구되는 커패시터 전압의 스위칭 리플( $r$ )과 인버터 전류의 스위칭 리플( $a$ )에 따라 설계한 최종 필터 값이 위의 가이드라인을 만족하지 못할 수 있다. 그림 3은 스위칭 주파수를 10kHz, 계통전류의 고조파 리플을  $x$ 를 0.003으로 필터를 설계해야 하는 경우 위의 가이드라인을 만족하는  $r$ 과  $a$ 의 범위를 나타낸다. 따라서 주어진 설계사양에 따라  $r$ 과  $a$ 를 적절히 조정해야 한다.

### 3. 실험 결과

제안한 3상 LCL필터설계의 타당성을 입증하기 위하여 1kW 급 시작품을 제작하여 실험하였으며 시작품을 위한 시스템 파라미터는 다음과 같다.

- P = 2.7kW
- $V_{LL} = 220V$
- $f_{sw} = 10kHz$
- $L_i = 1.78mH$
- $C_f = 5\mu F$
- $L_g = 1.6m$
- $x = 0.003$
- $a = 0.114$
- $r = 0.025$

그림 4는 실제계통과 연계하여 계통연계 시 인버터전류 및 부하전압, 계통전류 실험파형이며 계통전류의 THD는 약 5%이내이다. 그림 5~7은 각각의 FFT 파형이며, 계통전류의 스위칭 성분이 기본파의 약 0.001로 설계 조건 0.003이하로 만족한다. 인버터전류와 부하전압의 스위칭 성분도 설계조건을 만족한다.

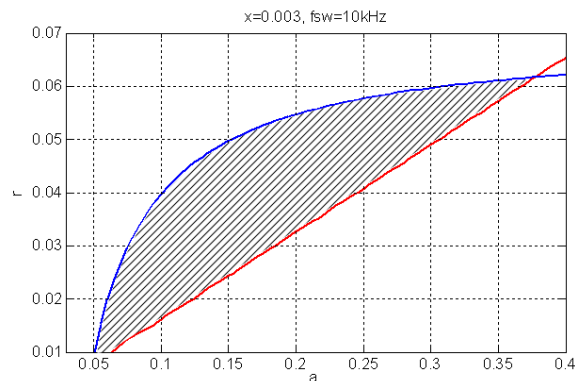


그림 3 설계조건을 만족하기 위한  $r$ 과  $a$ 의 선정가능 범위

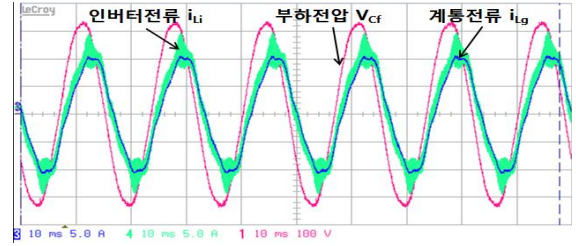


그림 4 계통연계 시 부하전압 및 계통전류 실험 파형

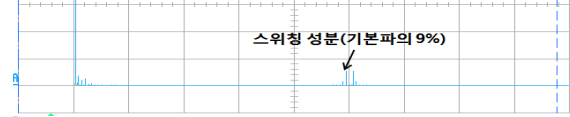


그림 5 인버터전류( $i_{Li}$ ) FFT

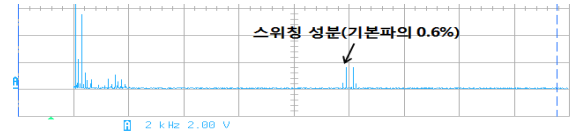


그림 6 부하전압( $V_{Cf}$ ) FFT

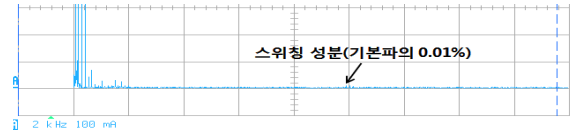


그림 7 계통전류( $i_{Lg}$ ) FFT

### 4. 결론

본 논문에서는 LCL필터 모델링을 통해 독립부하가 존재하는 계통연계 시스템에서 계통 주입 전류품질과 독립부하의 전압품질을 만족할 수 있는 LCL필터 설계 방법을 제안하였으며 설계 파라미터 변화에 따른 LCL필터 값의 변화에 대해 분석하였다. 또한 설계 조건을 만족하기 위한 각 파라미터의 선정 범위에 대해 분석하였다. 제안한 설계 방법은 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2008-N-FC12-J-04-2100)

### 참고 문헌

- [1] *Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547.2-2008.
- [2] 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,
- [3] Yongqiang Lang, Dianguo Xu, Hadiananrei 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.
- [4] 박중형, 지민훈, 김홍근, 전태원 노의철, "충고조파 왜율과 리플 감쇄율을 이용한 계통연계형 PCS용 LCL필터설계", *전력전자학회논문지*, 제15권 제3호 2010.6, pp. 235-243
- [5] N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd ed." New York: Wiley, 1995.