

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^[1] 규정에 의해 고조파를 제한하고 있다^[3]. 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^[3,4]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.

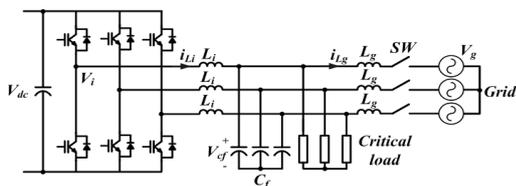


그림 1. 독립부하가 존재하는 3상 계통연계 인버터

2. 제안하는 LCL필터 설계

각 필터값 L_i , C_f , L_g 식은 다음과 같다.^[5]

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

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

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

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.^[6]

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

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^[3]

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

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(ω_{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.

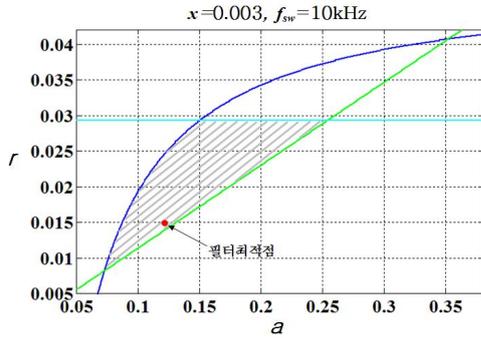


그림 2. 설계조건을 만족하는 a 와 r 의 영역과 필터최적점

그림 2는 스위칭주파수를 10kHz, $x=0.003$, $d<0.03$ (IEEE519^[2]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 ω_{res} (시스템 밴드위스)

위의 각 평가기준에 따라 가중치 λ 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.

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

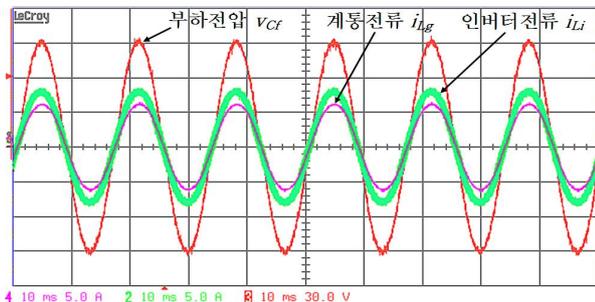


그림 3. 계통연계 시 부하전압 및 계통전류, 인버터전류 파형

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.

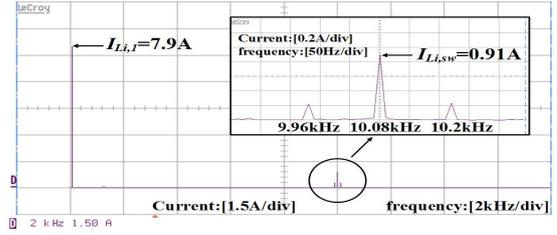


그림 4. 인버터전류(i_{Li}) FFT

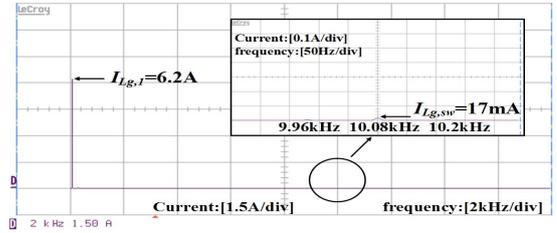


그림 5. 계통전류(i_{Lg}) FFT

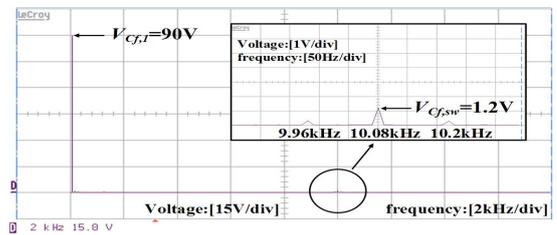


그림 6. 부하전압(V_{CF}) FFT

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.