

계통연계 및 독립운전을 하는 계통연계 인버터의 LCL필터 최적 설계기법

정상혁, 김형진, 최세완, 김태희*, 이기풍*, 이태원*
 서울과학기술대학교, *두산중공업

Optimized LCL filter Design Method of Utility Interactive Inverter with grid-tied and stand-alone Operations

Sanghyuk Jung, Hyungjin Kim, Sewan Choi, Taehee Kim, Gipung Lee, Taewon Lee
 Seoul National University of Science and Technology, *Doosan Heavy Industries & Construction Corporation

ABSTRACT

독립부하가 존재하는 계통연계 인버터에서 LCL필터 설계시 계통으로 주입하는 전류뿐만 아니라 독립부하 전압품질도 고려되어야 한다. 또한, LCL필터의 가격과 부피측면을 고려하여 고조파 감쇠율은 기준을 만족하면서 인덕턴스와 캐패시턴스는 가능한 작게 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 계통전류의 고조파 기준은 만족하고, LCL필터 모델로부터 구해지는 전달함수를 이용하여 계통연계시와 독립운전시 모두 독립부하의 전압품질이 만족하도록 필터설계를 한다. 또한, 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용한 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

1. 서론

계통연계 인버터의 PWM 동작으로 인하여 발생하는 고조파 성분은 IEEE1547 규정에 의해 제한된다. LCL필터는 저가격과 작은 부피로도 고조파를 효율적으로 저감시킬 수 있는 장점 때문에 많이 사용되고 있으며, 여러 LCL필터 설계방법들^[2,4]이 제시되었다. 하지만 기존 설계방법들^[2,3]은 계통전류의 고조파 저감만을 고려하였기 때문에 그림 1과 같이 독립부하(예를 들면 연료전지 시스템의 BOP)에도 동시에 전력을 공급하는 시스템인 경우 독립부하의 전압 품질을 보장할 수 없다. 문헌[4]에서는 독립부하의 전압품질을 고려하였지만, 독립운전시 독립부하의 전압품질은 저하될 수 있고, 독립부하의 소비전력을 고려하지 않아 계통전류가 고조파 기준을 만족하지 않을 수 있다.

본 논문에서는 계통연계시 계통전류의 고조파 기준은 만족하고, 계통연계시와 독립운전시 모두 독립부하의 전압품질이 만족하도록 필터설계를 한다. 또한, 설계자가 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용할 수 있는 LCL필터 최적설계 방법을 제안한다.

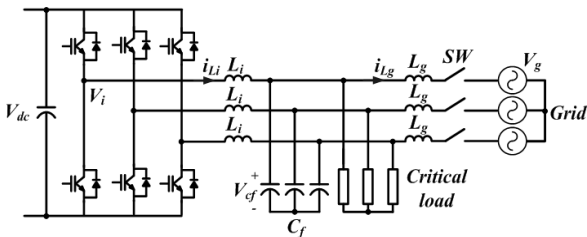


그림 1. 독립부하가 존재하는 3상 계통연계 인버터

2. 제안하는 LCL필터 설계기법

LCL필터 모델로부터 아래의 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{V_{Cf}(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{L_i \cdot C_f \cdot s^2 + 1} \quad (\text{독립운전}) \quad (1)$$

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

SPWM($m_a=0.8$)을 사용하고 스위칭 주파수가 계통주파수에 비해 매우 크다고 가정하면 $V_{i,sw}$ 은 다음과 같다.^[5]

$$V_{i,sw} = \frac{0.818 \cdot V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

위 (1), (2), (3)식을 이용하여 다음과 같이 필터 값을 구한다.

$$L_i = \frac{0.868 \cdot V_{dc} \cdot V_g}{\omega_{sw} \cdot r_{Li} \cdot P} \quad (\text{여기서 } r_{Li}=I_{Li,sw}/I_{Li,l}) \quad (4)$$

$$C_f = \frac{P \cdot r_{Li} \cdot A}{3 \cdot V_g^2 \cdot \omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}} \quad (5)$$

여기서 $r_{Cf}=V_{Cf,sw}/V_{Cf,l}$, $A=V_{dc}-3.458 \cdot V_g \cdot r_{Cf}$ 임

$$L_g = \frac{3 \cdot V_g^2 \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf} (r_{Li} \cdot P_r^{-1} - r_{Lg})}{\omega_{sw} \cdot P \cdot r_{Li} \cdot r_{Lg} \cdot A} \quad (6)$$

여기서 $r_{Lg}=I_{Lg,sw}/I_{Lg,l}$, $P_r=I_{Lg,l}/I_{Li,l}$ 임

LCL필터 설계시 전체 인덕턴스(L_t)의 제한조건은^[2]

$$L_t \leq 0.1L_b \quad (7)$$

이고, 식(4), (6), $L_t=L_i+L_g$, $L_b=Z_b/\omega_l$, $Z_b=V_{LL}^2/P$ 를 대입하여 식(7)을 만족하는 r_{Li} 를 구할 수 있다.

$$r_{Li} \geq \frac{2.89V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot P_r \cdot r_{Lg} (2A - V_{dc})}{V_g (\omega_{sw} \cdot P_r \cdot r_{Lg} \cdot A - 10V_{dc} \cdot \omega_1 \cdot r_{Cf})} \quad (8)$$

캐패시턴스(C_f)의 제한조건

$$C_f \leq 0.05C_b \quad (9)$$

에 식(5), $C_b=(\omega_l \cdot Z_b)^{-1}$ 를 대입하여 식(9)를 만족하는 r_{Li} 는

$$r_{Li} \leq \frac{0.05\omega_{sw} \cdot V_{dc} \cdot r_{Cf}}{\omega_1 \cdot A} \quad (10)$$

이고, 공진주파수(ω_{res})의 제한조건

$$\frac{\omega_{sw}}{2} \geq \omega_{res} \geq 10\omega_1 \quad (11)$$

에 $\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}}$, 식(4), (5), (6)를 대입하여 식(11)를 만족하는 r_{Li} 는 다음과 같다.

$$\frac{r_{Lg} (2.25A - V_{dc})}{P_r^{-1} (1.25A - V_{dc})} \leq r_{Li} \leq \frac{r_{Lg} [\omega_{sw}^2 (2A - V_{dc}) + 100\omega_1^2 \cdot A]}{P_r^{-1} [100\omega_1^2 \cdot A - \omega_{sw}^2 (V_{dc} - A)]} \quad (12)$$

따라서 필터설계 제한조건인 식(7),(9),(11)를 만족하는 LCL필

터 설계값은 식(8),(10),(12)에서 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역으로부터 구할 수 있으며, 그림 2와 같다.

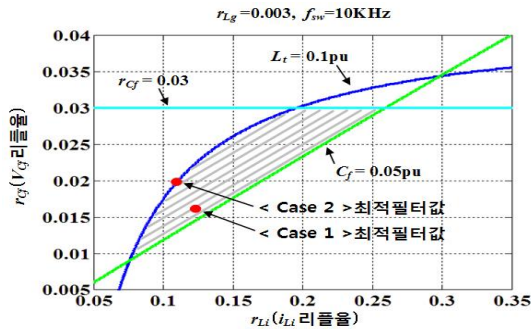


그림 2. 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역과 최적 필터값

그림 2는 스위칭주파수를 10kHz, $r_{Lg}=0.003$, $r_{Cf} \leq 0.03$ (IEEE519^[1]규정을 적용)로 필터를 설계한 경우 위의 설계조건을 만족하는 r_{Li} 와 r_{Cf} 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 r_{Cf} (독립부하 전압품질)
- E_4 : 공진주파수 ω_{res} (시스템 밴드위스)

위의 각 평가기준에 따라 가중치 λ 를 고려한 평가식은

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

이다. 위 식의 결과값인 $Eval$ 이 조건에 따라 최대 또는 최소가 되는 r_{Li} 와 r_{Cf} 로부터 최적의 필터값을 구할 수 있으며 최적 필터값은 각 평가기준에 부여되는 가중치 λ 에 따라 달라질 수 있다.

3. 실험 결과

제한한 3상 LCL필터 최적설계의 타당성을 입증하기 위하여 시작품을 제작하였다. 다음은 실험에서 사용한 파라미터이다

$$\cdot P = 4kW \quad \cdot V_{LL} = 220V \quad \cdot f_{sw} = 10kHz \quad \cdot r_{Lg} = 0.003$$

— < Case 1 : 총 인덕턴스에 가중치를 크게 부과한 경우 > —

- $\lambda_1 = 0.5$ · $\lambda_2 = 0.25$ · $\lambda_3 = 0.1$ · $\lambda_4 = 0.15$
- $L_t = 1.6mH$ · $C_f = 9.7\mu F$ · $L_g = 1.2mH$
- $r_{Li} = 0.123$ · $r_{Cf} = 0.0162$
- $L_t = 0.086PU$ · $C_f = 0.044PU$ · $f_{res} = 1.96kHz$

— < Case 2 : 필터 커패시터에 가중치를 크게 부과한 경우 > —

- $\lambda_1 = 0.2$ · $\lambda_2 = 0.6$ · $\lambda_3 = 0.1$ · $\lambda_4 = 0.1$
- $L_t = 1.78mH$ · $C_f = 7\mu F$ · $L_g = 1.44mH$
- $r_{Li} = 0.11$ · $r_{Cf} = 0.02$
- $L_t = 0.1PU$ · $C_f = 0.032PU$ · $f_{res} = 2.12kHz$

위의 두 경우 모두 총 인덕턴스, 커패시턴스, 공진주파수가 설계조건을 모두 만족하는 것을 확인할 수 있다. 시작품은 < Case 1 > 의 필터설계값으로 실험을 진행하였다.

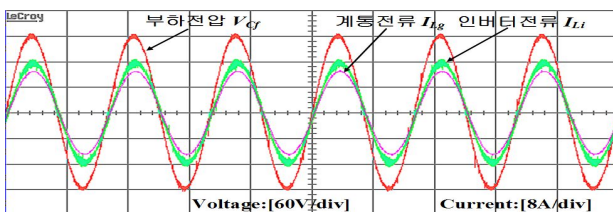


그림 3. 계통연계 시 부하전압 및 계통전류, 인버터전류 파형

그림 3은 계통연계시 부하전압 V_{Cf} , 계통전류 i_{Lg} , 인버터전류 i_{Li} 각 파형이고, 계통전류의 THD는 5%이내이다. 인버터전류 기본파에 대한 계통전류 스위칭성분(r_{Lg}) 측정값은 0.0025(설계 목표값:0.003)(그림 4), 독립부하의 양단전압 기본파에 대한 스위칭성분(r_{Cf}) 측정값은 계통연계시 0.0145(설계목표값:0.0162)(그림 5), 독립운전시 0.0155(설계목표값:0.0162)(그림 6)으로 설계목표를 모두 만족한다.

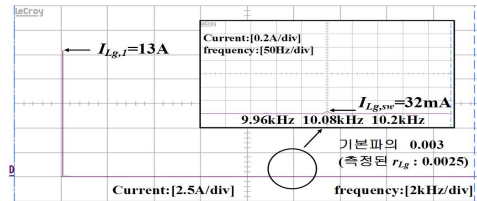


그림 4. 계통전류(i_{Lg}) FFT(계통연계시)

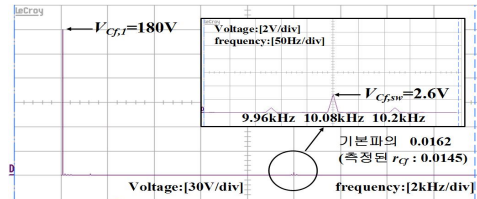


그림 5. 부하전압(V_{Cf}) FFT(계통연계시)

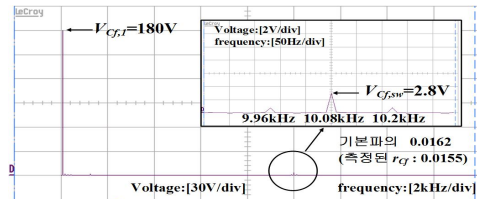


그림 6. 부하전압(V_{Cf}) FFT(독립운전시)

4. 결론

본 논문에서는 독립부하가 존재하는 계통연계 시스템에서 계통전류의 고조파 기준을 만족하면서 독립부하 전압리플, 인덕터 부피, 무효전류량, 시스템 대역폭에 가중치를 적용한 LCL필터 최적설계방법을 제안하였다. 그리고 LCL설계영역을 r_{Li} 와 r_{Cf} 의 영역으로 나타내어 분석하였다. 제안하는 최적 설계방법으로 실험을 진행하였으며, 타당성을 증명하였다.

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

참고 문헌

- [1] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE Std. 519-1992*.
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter based active rectifier", *IEEE Ind. Applcat.*, Vol. 1, pp. 297-307. Oct. 2001.
- [3] 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.
- [4] 정상혁, 김영우, 오형민, 최세완, "독립부하의 전압리플을 고려한 계통연계형 인버터의 LCL필터 최적설계", 전력전자학회 2011년도 하계학술대회 논문집 2011.7, pp. 196-197
- [5] N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd" ed." New York: Wiley, 1995.