

고조파 전류와 전류 제어기의 안정성을 고려한 LCL필터 설계

신동설*, 이경준*, 김희제*, 이종필**, 김태진**, 유동욱**
 부산대학교 전기공학과*, 한국전기연구원**

LCL Filter Design with Consideration for Current Harmonics and Stability of Current Controller

Dongsul Shin*, Kyoung-Jun Lee*, Hee-Je Kim*
 Jong-Pil Lee**, Tae-Jin Kim**, Dong-Wook Yoo**

Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University*
 Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)**

ABSTRACT

대용량 계통연계형 인버터에서 필터의 사이즈와 가격을 줄이고, 빠른 동적 특성을 얻기 위해서 LCL필터가 많이 사용된다. LCL필터 설계 시에 계통으로 유입되는 고조파 전류를 제한하는 것이 주된 목적이지만, LCL필터가 가지는 공진 특성 또한 고려되어야 한다. 그리고 인버터 전류 피드백으로 전류 제어 루프를 구성하는 경우와는 달리 계통 전류 피드백으로 인버터의 전류 제어 루프를 구성하게 되면 전자보다 더 안정적인 운전영역을 확보하게 된다. 하지만 이러한 운전영역 또한 LCL필터를 어떻게 설계하느냐에 따라 달라진다. 본 논문에서는 계통전류의 고조파 제한과 함께 전류제어기의 안정성을 고려한 LCL필터 설계 기법을 제안하고자 한다. 제안된 설계 기법을 통해서 얻어진 결과를 7.5kW급 계통연계형 인버터 시작품을 통해서 검증하였다.

1. 서론

계통연계형 인버터에 사용되는 필터는 인버터의 스위칭으로 인해 생성되는 고조파 전류가 계통으로 유입되는 것을 최소화 하는 기능을 한다. IEEE 519-1992에서는 THD와 각 고조파 성분마다의 크기 제한에 대한 기준을 권고하고 있다. 대용량 계통연계형 인버터에서 인덕터를 사용하여 필터를 구성할 경우, 계통으로 유입되는 고조파 전류의 크기를 권고되는 기준(IEEE 519-1992)에 만족시키기 위해서는 커패시터를 함께 사용한 경우에 비해서 그 인덕턴스가 커서 부피가 커지고 함께 제작 비용도 많이 증가하게 된다. 이와 더불어 높은 인덕턴스로 인해서 속응성 또한 좋지 않게 된다^[1]. 이러한 이유에서 대용량 계통연계형 인버터에서는 인덕터와 커패시터를 함께 사용하지만, 이것들의 공진 특성으로 인해 시스템이 불안정해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 다양한 댐핑 기법들을 사용하고 있다.

시스템의 안정성은 스위칭 주파수(f_s), 공진 주파수(f_{res})와 밀접한 관계가 있다^[2]. 안정적인 인버터 운전을 위해서는 f_{res} 를 알맞은 주파수 대역으로 위치시켜야 한다. 이 영역을 벗어 날 경우 필터의 공진 특성으로 인해 전류제어기 이득 선정이 제한된다.

본 논문에서는 계통전류의 고조파 제한과 함께 전류제어기의 안정성을 고려한 LCL필터 설계 기법을 제안하고자 한다. 제안된 설계 기법을 통해서 얻어진 결과를

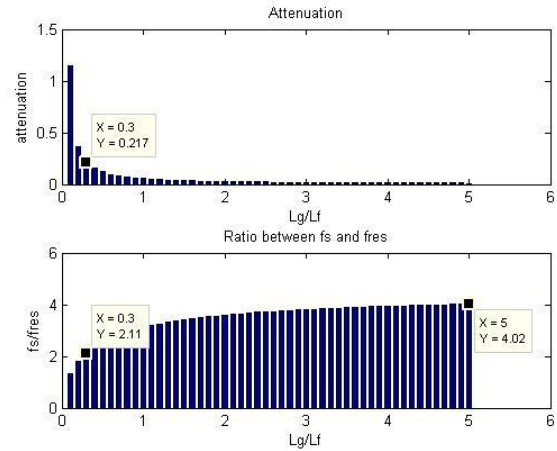


그림 1. L_g 의 변화에 따른 f_{res} 의 변화 추이

7.5kW 시작품을 통해서 검증하였다.

2. 제안하는 LCL필터 설계 기법

인버터 측의 인덕턴스(L_f)는 SPWM(Sinusoidal Pulse-Width Modulation) 스위칭 방식에서의 고조파 전류를 기준으로 계산한다^[4].

$$L_f = \frac{1}{\sqrt{48}} \frac{V_{DC}}{2f_s(i_{inv,rms} \cdot \alpha / 100)} \sqrt{\frac{3}{2} MI^2 - \frac{4\sqrt{3}}{\pi} MI^3 + \frac{9}{8} MI^4} \quad (1)$$

α 는 정격전류에 대한 고조파 전류의 백분율로서 정격전류의 10~15% 사이에서 선정한다.

커패시턴스(C_f)를 선정할 때에는 이후에 선정할 계통 측의 인덕턴스(L_g)에 따른 필터의 f_{res} 의 변동을 고려한다. 선정된 L_f 와 임의의 C_f 그리고 L_f 에 대한 L_g 의 비율을 r 로 놓았을 때 식(2)를 통해서 L_g 에 따른 f_{res} 의 변화를 확인할 수 있다.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1+r}{r}\right) \left(\frac{1}{L_f C_f}\right)} \quad (2)$$

C_f 선정 시에는 f_{res} 가 식(3)의 범위 안에 존재하도록 한다. 계통 전류 피드백으로 전류 제어를 하는 경우, 이 범위를 벗어나게 되면 공진 특성으로 인해 전류 제어기의

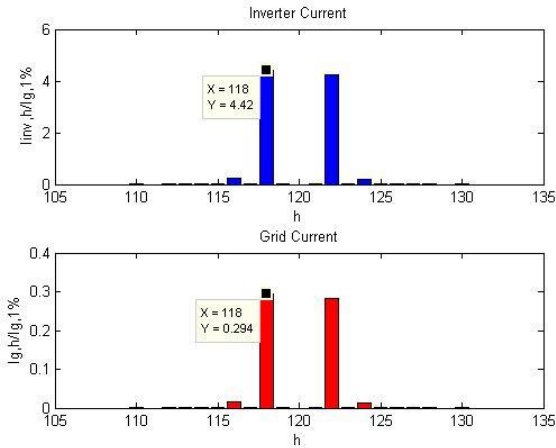


그림 2. 인버터 전류와 계통 전류의 고조파 성분

이득 선정이 제한된다^[2].

$$\frac{f_s}{4} < f_{res} < \frac{f_s}{2} \quad (3)$$

식 (3)의 범위 안에서 f_{res} 가 유지되도록 하기 위해서 L_g 가 충분히 클 때 f_{res} 가 f_s 의 1/4배 보다 크도록 C_f 를 선정한다. 이와 같은 방식으로 C_f 를 선정하면 계통 임피던스가 필터에 추가되더라도 필터의 f_{res} 가 식 (3)의 범위 안에 존재하도록 하는 것이 가능하다. 그림 1은 7.5kW 용량 기준으로 선정된 $L_f(700\mu\text{H})$ 와 $C_f(13.5\mu\text{F})$ 를 사용했을 때, L_g 의 변화에 따른 고조파 전류의 감쇠와 f_{res} 의 변동을 보여준다. L_g 가 L_f 의 0.1 ~ 5배까지 변화했을 때, f_{res} 는 f_s 의 1/4.02 배까지 변하고 그 크기가 점점 포화되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 f_{res} 가 f_s 의 1/2배 보다 작아야 하므로 L_g 는 L_f 의 0.3배의 최소값(210 μH)을 가져야 할 것이다.

마지막으로 고조파 전류의 크기가 IEEE Std. 519-1992가 권고하는 기준에 맞는 지를 확인하여 L_g 를 선정하면 된다. SPWM의 경우 m_f-2 차 고조파 전압이 가장 크다. 그래서 m_f-2 차 고조파 전류가 그 기준을 만족한다면 나머지 고조파 전류들도 기준을 만족하게 된다^[3]. 식 (4-6)을 통해서 계통 고조파 전류를 확인한다.

$$V_{inv,h} = \frac{2V_{DC}}{\sqrt{2}M\pi} J_N \left(M \frac{\pi}{2} M I \right) \sin \left[\left(M + N \right) \frac{\pi}{2} \right] \sin \left(N \frac{\pi}{3} \right) \quad (4)$$

$$i_{inv,h} = \frac{\left(-(\omega_g h)^2 + z_{LC}^2 \right)}{\omega_g h L_{f,inv} \left(-(\omega_g h)^2 + \omega_{res}^2 \right)} V_{inv,h} \quad (5)$$

$$i_{g,h} = \left| \frac{(k_{f,h})^2}{(k_{f,h})^2 - r - 1} \right| i_{inv,h}, \quad k_{f,h} = \frac{\omega_{res}}{\omega_h} = \frac{\omega_{res}}{\omega_g h} \quad (6)$$

그림 2는 앞서 선정된 L_f , C_f 를 사용하여 얻은 최종 고조파 전류의 크기를 보여준다. L_g 는 600 μH (L_f 의 0.857배)를 사용하였고, m_f-2 차의 계통 고조파 전류(0.2873%)가 권고하는 기준(0.3%)을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

3. 실험결과

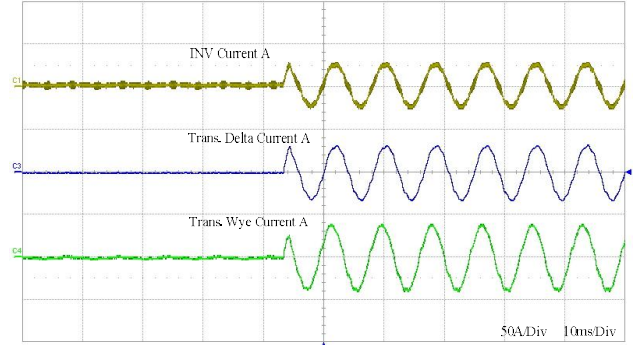


그림 3. 전류의 스텝응답

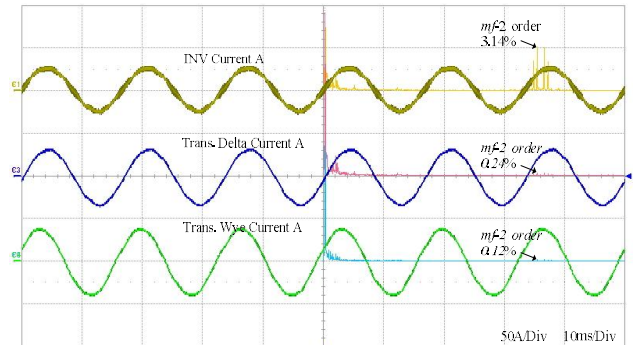


그림 4. 전류의 정상상태와 m_f-2 차 고조파 전류

앞서 제시한 설계 기법을 통해 얻은 파라미터를 가지고 7.5kW 계통연계형 인버터에 적용하였다. 그림 3은 전류제어기의 스텝 응답을 보여준다. 그림 4는 각 전류의 정상상태와 고조파 전류의 m_f-2 차 성분을 보여준다. 제안하는 설계 기법의 타당성을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고조파 전류와 전류제어기의 안정성을 고려한 LCL필터 설계 기법을 제안한다. 제안한 설계 기법을 통해 얻어진 파라미터를 7.5kW 계통연계형 인버터 적용하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCLfilter-based three-phase active rectifier," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, Sep./Oct. 2005.
- [2] J. Dannehl, C. Wessels, F. W. Fuchs "Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 2, pp. 380-388, Feb. 2009.
- [3] K. Jalili, and S. Bernet, "Design of LCL Filters of Active-Front-End Two-Level Voltage-Source," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 5, pp. 1674-1689, May. 2009.
- [4] D. G. Holmes and T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters. New York: Wiley, 2003