

계통연계형 인버터의 고조파 전류저감을 위한 LLCL 필터에 관한 연구

안병웅¹, 홍창표¹, 김학원[†], 조관열¹, 임병국¹

A Study on LLCL Filter to Reduce Harmonic Current of Grid Connected Power Inverter

Byoung-Woong An¹, Chang-Pyo Hong¹, Hag-Wone Kim[†], Kwan-Yuhl Cho¹, and Byung-Kuk Lim¹

Abstract - In this paper, the new LLCL filter is proposed for grid connected three-phase PWM inverter for passive damping. LLCL filter inserts a small inductor in the branch of the capacitor of the traditional LCL filter to compose a series resonant circuit to reduce the switching-frequency component on grid current. Using LLCL filter, the switching-frequency current ripple components can be attenuated much better than the LCL filter, leading to a decrease in the total inductance. However, the resonance phenomena caused by zero impedance from the addition of LC branch in LLCL filter can be a big problem. Resonance phenomena of LLCL filter can be a source of grid system instability, so proper damping methods are required. However, it is difficult to apply a passive damping method in the conventional LLCL filter, because the damping resistor increase impedance of the LC branch. Therefore, switching frequency component of grid current can not much attenuated by low Q of LC series resonance effect. In this paper, a new LLCL filter is proposed to overcome the conventional LLCL filter with passive damping. The validity of the proposed method is proven by simulation and experimental result.

Keywords: LLCL filter, grid connected PWM inverter, passive damping

1. 서 론

그림 1은 계통 연계형 3상 펄스 폭 변조 (Pulse width modulation 이하 PWM) 인버터를 나타낸다. 계통 연계형 3상 PWM 인버터 출력 전류에 포함되는 전류의 고조파 성분은 계통에 연계된 타 장비에 장애를 일으키는 원인이 된다.^[1] 일반적으로, 전류 고조파를 저감하기 위하여 큰 인덕턴스를 갖는 1차 인덕터 필터(Inductor Filter)를 사용하나, PWM 스위칭 주파수 성분에 해당되는 주파수 성분 및 스위칭 고조파를 저감하기 위해서는

매우 큰 인덕턴스(Inductance) 값이 요구된다. 이는 인버터 시스템의 부피와 재료비의 상승을 유발하고, 전류 제어 동특성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 최근, 이와 같은 문제를 해결하기 위해 상대적으로 작은 인덕턴스 값으로도 우수한 고조파 전류 저감 효과를 갖는 LCL 필터가 계통 연계 인버터에 적용 되는 추세에 있다^[2]. 또한 LCL 필터는 작은 인덕턴스 값으로 인하여 빠른 전류 제어 동특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만, LCL 필터의 경우도 PWM 스위칭 주파수 성분에 해당되는 고조파를 저감을 위한 IEEE 519 규제를 만족하기 위해서는 일정 인덕턴스 값 이상을 요구하게 되고, 이 또한 시스템의 부피와 재료비를 상승시키는 요인이 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에 LLCL 필터가 연구되고 있다. LCL 필터를 기반으로 한 LLCL 필터의 경우 LCL 필터의 캐패시터 단에 직렬로 작은 인덕턴스를 갖는 인덕터를 직렬로 추가한 형태로, 캐패시터와 인덕터의 직렬공진을 이용하여 LCL 필터에 비해 PWM 스위칭 주파수 성분에 해당하는 고조파를 좀 더 효과적으로

Paper number: TKPE-2014-19-1-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: khw@ut.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation
Tel: +82-43-841-5322 Fax: +82-43-841-5320

¹ Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea Nat'l Univ of Transportation

Manuscript received Sep. 23, 2013; accepted Dec. 9, 2013

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

저감 할 수 있고, LCL 필터에 비해 더 적은 계통 측 인덕터 용량으로도 LCL 필터와 유사한 고조파 감쇄 효과를 낼 수 있어, 시스템의 부피 및 재료비를 저감시킬 수 있고, 이로 인해 빠른 동특성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다고 보고된 바 있다^[3].

LCL 필터와 LLCL 필터를 갖는 인버터 시스템은 기존의 1차 인덕터 필터를 갖는 인버터 시스템과 다르게 LC가 추가됨으로 인하여 임피던스가 0이 되는 주파수가 존재하고, 이로 인한 필터의 공진문제가 발생한다^{[4]-[9]}. 이러한 특정 주파수에서 공진 특성은 시스템 불안정의 원인이 되므로 이에 맞는 댐핑(Damping)을 필요로 한다. 하지만 기존에 제안한 LLCL 필터의 경우 댐핑을 적용할 경우 특정 주파수에서 공진 특성 효과는 억제할 수 있지만, PWM 대역의 고조파 저감을 위한 LC 직렬 공진 효과 또한 감쇄하여 PWM 주파수대역의 고조파 저감 효과를 얻기 힘든 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 PWM 주파수 성분의 고조파 저감 효과는 댐핑 저항이 없는 경우와 동일한 효과를 얻으면서, LLCL 필터의 공진을 효과적으로 억제하는 새로운 LLCL 필터를 제안한다. 또한 제안하는 새로운 LLCL 필터의 PWM 스위칭 성분의 고조파 감쇄효과에 대해 시뮬레이션 및 실험을 실시하여 적용 가능성 및 그 효과를 입증 하였다.

2. LLCL 필터의 모델링 및 기존방식의 문제점

2.1 LLCL 필터의 모델링

그림 2은 LLCL 필터를 나타낸다. 그림 2에서 알 수 있듯이 LLCL 필터의 경우 LCL 필터의 캐패시터 단에 직렬로 인덕터를 추가한 형태로 캐패시터와 인덕터의 직렬공진을 이용하여 PWM 주파수 대역의 고조파를 저감시키는 원리이다. 그림 3에서와 같이 캐패시터와 인덕터의 직렬 공진주파수를 PWM 주파수와 동일하게 설계하여 PWM 주파수 대역의 고조파를 저감시킬 수 있다. LLCL 필터의 주파수에 따른 임피던스 특성을 알아보기

위해 그림 2에 키르히호프의 전압, 전류 법칙을 적용하여 전압, 전류 방정식을 구하면 식(1)과 같다.

$$v_i(s) = i_i(s) * sL_i + i_g(s) * sL_g \tag{1}$$

$$i_i(s) = i_g(s) * sL_g * \frac{sC_f}{s^2L_fC_f + 1} + i_g(s)$$

여기서, $v_i(s)$ 는 인버터 출력 전압을, $i_i(s)$ 는 인버터 출력 전류를, $i_g(s)$ 는 계통 측 전류를 의미하며, 인버터 전압에 대한 계통 전류의 효과를 얻기 위하여 계통 전압은 중첩의 원리를 적용하여 0으로 하였다. 식(1)을 바탕으로 인버터 전압에 대한 계통 측 전류 응답을 주파수에 따라 나타내기 위한 LLCL 필터의 전달함수를 구하면 식(2)와 같다.

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{(L_gC_f + L_fC_f)s^2 + 1}{(L_iL_gC_f + L_fC_fL_T)s^3 + sL_T} \tag{2}$$

여기서 $L_T = (L_i + L_g)$ 이다.

식(2)를 이용해 LLCL 필터의 주파수 특성 보드 선도를

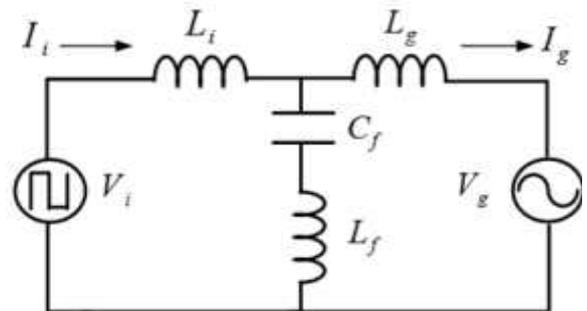


Fig. 2 Equivalent LLCL filter

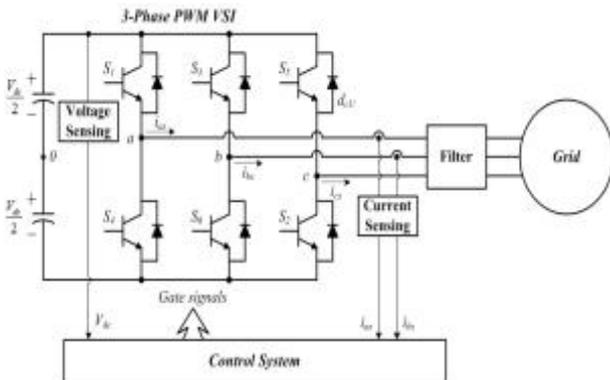


Fig. 1 General configuration of grid connected three-phase PWM inverter

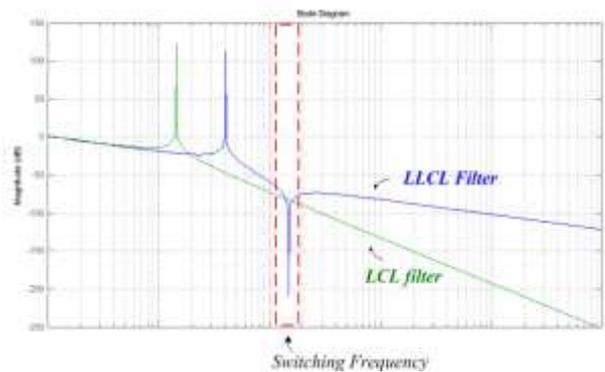


Fig. 3 Frequency characterist of LLCL filter

그리하면 그림 3과 같다. 그림 3에서와 같이 LLCL 필터는 LCL 필터와는 다르게 캐패시터 C_f 와 인덕터 L_f 의 직렬공진으로 인해 PWM 스위칭 주파수 대역에서의 이득이 마이너스 무한대의 값을 가지게 되고, 이는 PWM 주파수 성분의 고조파를 감쇄하는 역할을 한다.

2.2 기존 방식의 문제점

LCL 필터 및 LLCL 필터를 갖는 인버터 시스템은 추가된 LC로 인한 공진문제가 발생한다. 기존의 L 필터와는 다르게 LC가 추가됨으로 인하여 임피던스가 0이 되는 주파수가 존재하고, 이는 공진문제를 발생시키는 요인이 된다. 이러한 특정 주파수에서의 공진문제는 시스템 불안정의 원인이 되고, 또한 시스템에 연계된 타 장비에 고장을 유발시키는 원인이 된다. 따라서 공진을 억제하기 위한 댐핑(Damping)을 필요로 한다. 일반적인 시스템의 경우 수동 댐핑 방법을 주로 사용하는데, 수동 댐핑 방법은 필터 캐패시터에 직렬 또는 계통 인덕터와 병렬로 저항을 연결하는 간단한 방법으로 LC에 의한 공진 문제를 해결할 수 있다. 수동 댐핑 방법은 LCL 필터에는 쉽게 적용 가능 하지만, LLCL 필터의 경우 제약이 따른다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 LLCL 필터의 경우 캐패시터와 인덕터의 직렬공진으로 인해 PWM 스위칭 주파수 대역의 고조파를 감쇄 시키는 동작을 하게 되는데, LC에 의한 공진 문제를 해결하기 위해 적용한 수동 댐핑 방법이 캐패시터와 인덕터의 직렬 공진 가지의 품질 계수 Q를 떨어뜨려 LLCL 필터의 특징인 PWM 스위칭 주파수 대역의 고조파 감쇄 효과를 얻기 힘들다.

LC에 의한 공진 문제 해결을 위해 적용한 수동 댐핑 방법이 LLCL 필터에 미치는 영향을 확인하기 위해 그림 4와 같이 LLCL 필터의 수동 댐핑 방법을 모델링 하였다. 그림 4에 키르히호프의 전압, 전류 법칙을 적용하여 전압, 전류 방정식을 구하면 식(3)과 같다.

$$v_i(s) = i_i(s) * sL_i + i_g(s) * sL_g \quad (3)$$

$$i_i(s) = i_g(s) * sL_g * \frac{sC_f}{s^2L_fC_f + sC_fR_f + 1} + i_g(s)$$

식(3)을 바탕으로 인버터 전압에 대한 계통 측 전류 응답을 주파수에 따라 나타내기 위한 LLCL 필터의 전달 함수를 구하면 식(4)와 같다.

$$\frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{L_fC_f s^2 + C_fR_f s + 1}{(L_iL_gC_f + L_fL_T C_f)s^3 + L_T C_f R_f s^2 + sL_T} \quad (4)$$

여기서 $L_T = (L_i + L_g)$ 이다.

식(4)를 이용해 LLCL 필터의 주파수 특성 보드 선도

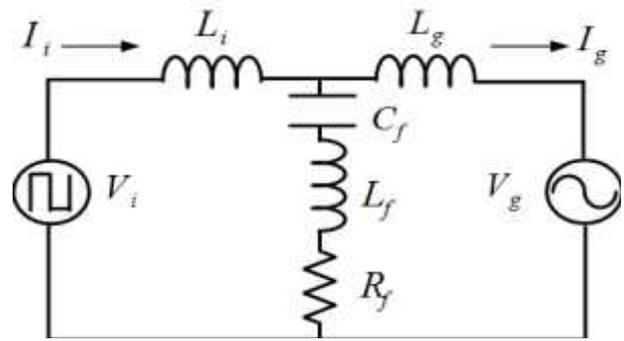


Fig. 4 Equivalent LLCL filter with passive damping

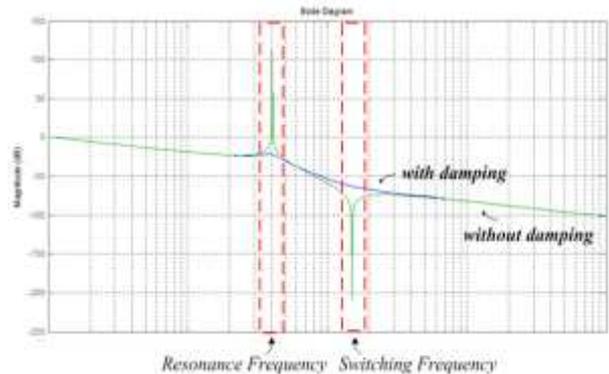


Fig. 5 Frequency characteristic of LLCL filter with passive damping

를 그리면 그림 5와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 공진 문제를 해결하기 위한 수동 댐핑에 의해 공진 주파수에서의 공진 현상은 억제된 것을 볼 수 있다. 하지만 LLCL 필터의 특징인 캐패시터와 인덕터의 직렬공진에 의한 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과 역시 댐핑 저항에 의해 억제되어 PWM 주파수 대역의 고조파 감쇄 효과를 얻기 힘들다.

본 논문에서는 PWM 주파수 고조파 저감효과는 댐핑 저항이 없는 경우와 동일한 효과를 얻으면서, LLCL 필터의 공진문제를 효과적으로 억제할 수 있는 새로운 LLCL 필터를 제안하고, 그 타당성을 시뮬레이션을 통해 입증 하였다.

3. 제안하는 새로운 LLCL 필터

3.1 제안하는 LLCL 필터의 모델링

그림 6은 제안하는 새로운 LLCL 필터이다. 2.2절에서 설명한바와 같이 일반적인 LLCL 필터의 경우 댐핑방법을 사용하기 쉽지 않다. 제안하는 새로운 LLCL 필터의 경우 기존의 필터 캐패시터와 병렬로 LC직렬 가지를 연결한 형태이다. 필터 캐패시터와 댐핑 저항이 직렬로 연결된 가지는 공진을 억제하는 효과를 얻고, 이와 병렬로 연결된 LC직렬 가지는 LC직렬 공진을이용해 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과를 얻을 수 있다.

제안하는 LLCL 필터의 주파수 특성을 알아보기 그림 6의 전달함수를 구하면 식(5)와 같다. 식(5)를 이용해 제안하는 LLCL 필터에 대한 주파수 특성 보드선도를 그리면 그림 7과 같다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 기존의 LLCL 필터와는 다르게 댐핑을 적용하여도 공진주파수에서는 공진 억제 효과를 가지면서 병렬로 연결된 캐패시터와 인덕터의 LC직렬 공진을 억제하지 않아 PWM 주파수 대역의 고조파 감쇄 효과를 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.2 제안하는 LLCL 필터의 설계

LCL 필터 및 LLCL 필터의 경우 최적화된 설계를 하는 것이 중요하다. 이에 제안하는 LLCL 필터는 다음과 같이 설계가 가능하다.

1) PWM 인버터 측 인덕터 L_i 의 크기는 기본주파수와 스위칭 주파수를 고려하여 PWM 인버터 측 인덕터의 전류 리플률 및 DC Link 전압으로 결정 할 수 있다. 인버터 측 인덕터 설계 시 전류 리플률을 작게 선정하면 인덕터의 용량이 커지게 되고 공진주파수가 낮아져 제어기의 대역폭에 가까워진다. 또한, 전류 리플률을 크게 선정하면 인버터 측 인덕터의 용량이 작아지게 되고, 이에 따라 공진주파수가 증가하게 되어 스위칭 주파수 대역에 가까워진다. 이로 인해 스위칭 주파수 대역에서의 공진 문제가 발생하게 된다. 따라서 공진주파수가 전류제어기의 대역폭과 스위칭 주파수 사이에 적절히 놓이도록 전류 리플률을 5%~30% 정도 선정하는 것이 적절하고, 선정된 전류 리플률과 스위칭주파수 및 DC Link 전압 등을 고려하여 PWM 인버터 측 인덕터는 식(6)과 같이 선정할 수 있다.

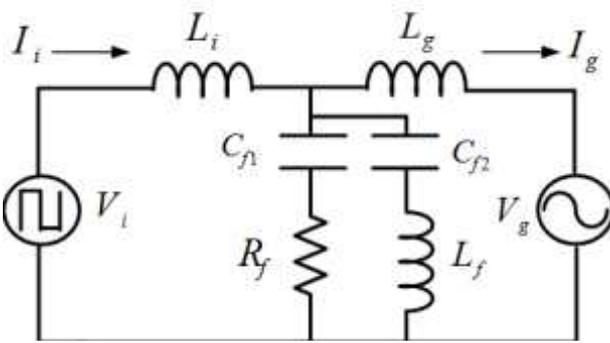


Fig. 6 Proposed method of LLCL filter circuit

$$L_i = \frac{V_{dc}}{4\sqrt{3}f_{sw}\Delta I} \quad (6)$$

여기서 V_{dc} 는 DC Link 전압이고 f_{sw} 는 스위칭 주파수, ΔI 는 전류 리플률이다.

2) 필터 캐패시터 C_{f1} 의 크기는 일반적으로 필터 캐패시터에 유입되는 무효전력을 적절한 역률을 유지하기 위해서 인버터 정격전력의 5%로 선정하고 이는 식(7)과 같다.

$$C_{f1} = \frac{5\%P_{rate}}{V_g^2\omega_{fund}} \quad (7)$$

여기서 P_{rate} 는 인버터의 정격전력, V_g 는 계통측 전압을 나타낸다.

3) LC직렬공진 가지의 캐패시터 C_{f2} 의 크기는 필터 캐패시터 C_{f1} 의 1/10 크기로 설계한다. 이는 필터 캐패시터 C_{f1} 가지와 LC 직렬공진 가지의 임피던스 차이로 인해 공진주파수 영역에서는 C_{f1} 가지를 통해 공진문제를 해결하고, PWM 스위칭 주파수 영역에서는 C_{f2} 가지를 통해 전류가 흐르게 되어 LC 직렬공진을 통해 PWM 스위칭 주파수 대역의 고조파를 효과적으로 감쇄시키는 역할을 하기 위해 C_{f1} 의 1/10 크기로 설계하고 이는 식(8)과 같다.

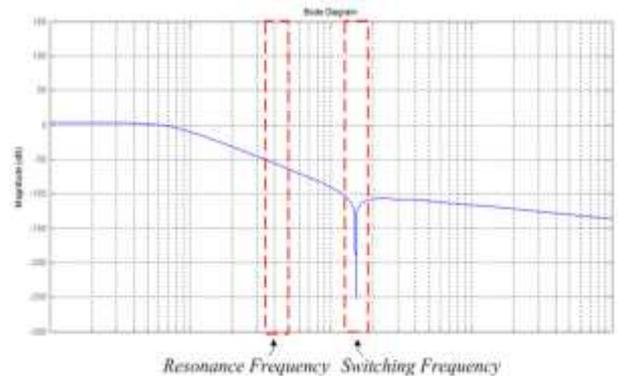


Fig. 7 Frequency characterist of LLCL filter with passive damping

$$\frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{(L_f C_{f1} C_{f2} R_f) s^3 + (L_f C_f) s^2 + (C_f R_f) s + 1}{(L_i L_g L_f C_{f1} C_{f2}) s^5 + C_{f1} C_{f2} (L_i L_g R_f + L_i L_f R_f + L_g L_f R_f) s^4} \quad (5)$$

$$+ (L_i L_g C_{f1} + L_i L_g C_{f2} + L_i L_f C_{f2} + L_g L_f C_{f2}) s^3 + (L_i C_{f1} R_f + L_g C_{f1} R_f) s^2 + (L_i + L_g) s$$

$$C_{f2} = \frac{C_{f1}}{10} \quad (8)$$

4) LC직렬공진 가지의 인덕터 L_f 의 경우 LC 직렬공진을 통해 PWM 주파수 대역의 고조파를 감쇄시키는 효과를 보기 위해 LC직렬공진의 공진주파수를 PWM 주파수와 동일하게 설정하여 설계하고, 이는 식(9)와 같다.

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_f C_{f2}}} \quad (9)$$

여기서 ω_s 는 PWM 스위칭 주파수를 나타낸다.

5) 그리드 측 인덕터 L_g 의 경우 PWM 스위칭에 의한 영향을 최소화하기 위하여 PWM에 의한 전류 리플 감쇄율로부터 결정할 수도 있다. 그러나 PWM 스위칭 주파수 성분의 전류 감쇄율로 결정하는 LCL 필터와는 다르게 LLCL 필터는 PWM 스위칭 주파수의 2배에 해당하는 주파수 성분의 전류 감쇄율로 결정하고, 이는 식(10)과 같다.^[3]

$$\frac{I_g(s)}{I_i(s)} = \frac{s^2 L_f C_{f2} + 1}{s^4 L_g L_f C_{f1} C_{f2} + s^2 (L_g C_{f1} + L_g C_{f2} + L_f C_{f2}) + 1} \quad (10)$$

6) 댐핑 저항 값은 공진주파수에서의 커패시터 리액턴스의 1/3로 설계하고, 이는 식(11)과 같다.

$$R_f = \frac{1}{3\omega_{res} C_{f1}} \quad (11)$$

여기서 f_{res} 는 공진주파수를 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 새로운 LLCL 필터의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK를 사용 하였다. 시뮬레이션 및 실험에서 사용된 3상 PWM 인버터의 파라미터와 필터 파라미터를 표 1에 나타내었다. 그림 8은 기존의 LLCL 필터의, 그림 9는 제안하는 LLCL 필터의 인버터 측 과 계통 측의 전류를 나타내고, 그림 10과 그림 11은 각각 기존의 LLCL 필터와 제안하는 LLCL 필터의 계통 측 전류의 FFT 분석 결과를 나타내었다. 그림 8과 그림 9의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 기존의 LLCL 필터와 제안하는 LLCL 필터 모두 우수한 고조파 감쇄 효과를 갖는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 그림 10의 기존 LLCL 필터의 계통 측 전류의 FFT 분석결과를 보면

Table 1 Simulation and Experiments Parameter

| Item | Value | Unit | |
|----------------------|----------|-----------|----------|
| DC Link Voltage | 630 | V_{rms} | |
| Switching Frequency | 15 | kHz | |
| Resonant Frequency | 4 | kHz | |
| Existing LLCL filter | L_i | 1.2 | mH |
| | C_f | 6.85 | μF |
| | L_f | 16.5 | μH |
| | L_g | 254 | μH |
| | R_f | 3 | Ω |
| Proposed LLCL filter | L_i | 1.2 | mH |
| | C_{f1} | 6.85 | μF |
| | C_{f2} | 0.75 | μF |
| | L_f | 150 | μH |
| | L_g | 254 | μH |
| R_f | 3 | Ω | |

공진을 억제하기 위해 적용한 댐핑에 의해 LC직렬 공진 또한 억제되어 LLCL 필터의 특징인 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과를 얻지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만, 그림 11의 제안한 LLCL 필터의 경우 그림 10의 기존 LLCL 필터와는 다르게 필터 커패시터와 댐핑 저항이 직렬로 연결된 가지에서는 공진을 효과

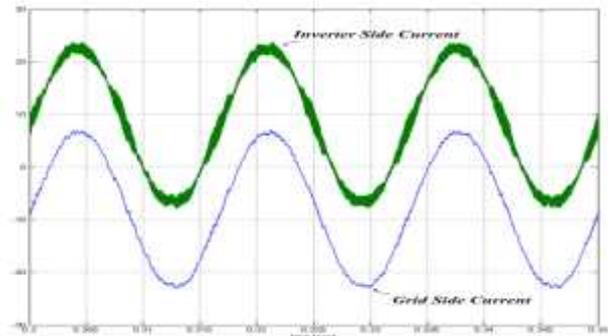


Fig. 8 Simulation result of conventional LLCL filter

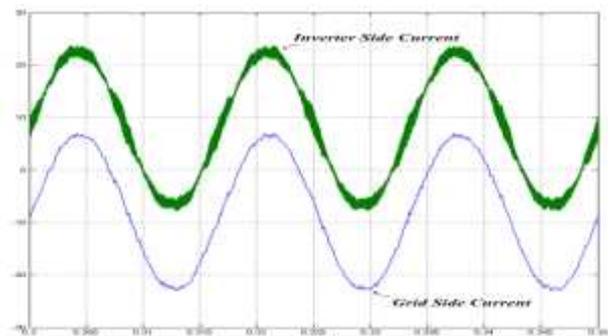


Fig. 9 Simulation result of the proposed LLCL filter

적으로 억제하고, 이와 병렬로 연결된 LC 직렬공진 가지에서는 LC 직렬공진을 통한 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄효과를 갖는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 실험 결과

LLCL 필터의 실제 적용가능성 여부를 확인하기 위해 시물레이션과 동일한 조건에서 실험을 실시하였다.

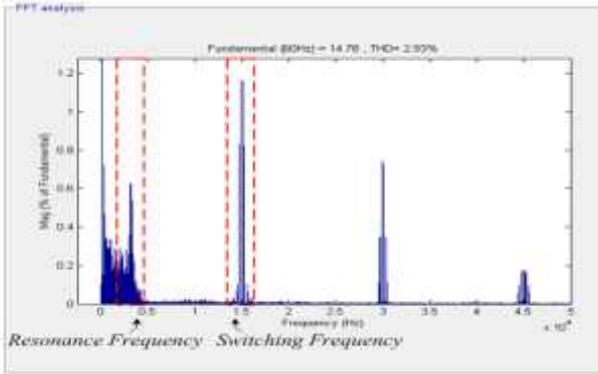


Fig. 10 Simulation result of conventional LLCL filter - FFT analysis

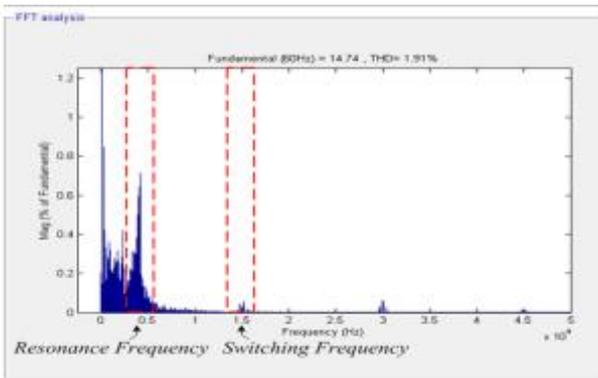


Fig. 11 Simulation result of the proposed LLCL filter - FFT analysis

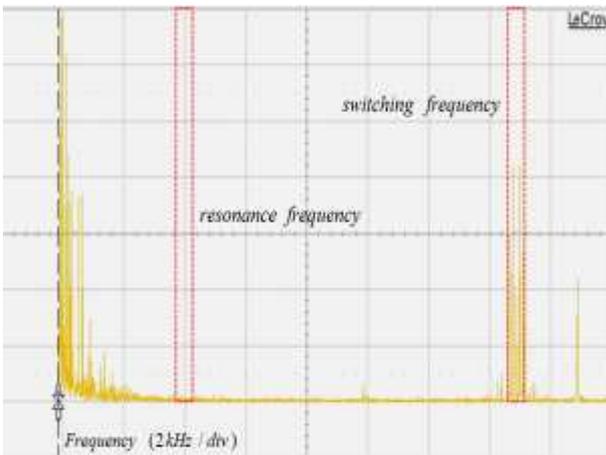


Fig. 12 Experimental result of conventional LLCL filter

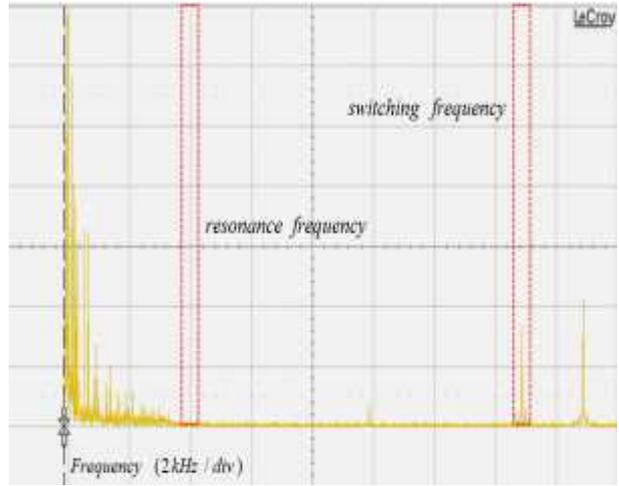


Fig. 13 Experimental result of the proposed LLCL filter

그림 12는 기존 LLCL 필터의 계통 측 전류의 FFT 분석 결과이고, 그림 13은 제안하는 LLCL 필터의 계통 측 전류의 FFT 분석 결과이다. 그림 12의 기존 LLCL 필터의 전류 FFT 분석결과는 그림 10의 시물레이션 결과와 마찬가지로 공진을 억제하기 위해 적용한 댐핑에 의해 LC 직렬공진 또한 억제되어 PWM 스위칭 주파수 대역에서의 고조파 감쇄효과를 얻지 못하는 것을 알 수 있고, 그림 13의 제안하는 LLCL 필터의 전류 FFT 분석결과 또한 그림 11의 시물레이션 결과와 마찬가지로 기존의 LLCL 필터와는 다르게 필터 캐패시터와 댐핑저항이 직렬로 연결된 가지에서는 공진을 효과적으로 억제하고, 이와 병렬로 연결된 LC 직렬 공진 가지에서는 LC 직렬 공진을 통한 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄효과를 갖는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통 연계형 인버터의 고조파 전류저감을 위한 새로운 LLCL 필터에 관해 제안하였다. 기존의 LLCL 필터의 경우 공진문제를 억제하기 위한 댐핑을 적용하였을 경우 LLCL 필터의 스위칭 고조파 감쇄효과를 얻지 못한다는 단점을 가지고 있는데, 이러한 단점을 해결하고자 PWM 주파수 고조파 감쇄 효과는 댐핑저항이 없는 경우와 동일한 효과를 얻으면서, LLCL 필터의 공진을 효과적으로 억제하는 새로운 LLCL 필터를 제안하였다. FFT분석을 통해 스위칭 주파수에서의 THD감소로 IEEE Std. 519-1992 3차 이상 하모닉 규정에 만족하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 새로운 LLCL 필터의 우수성을 보이기 위해 시물레이션과 실험을 수행하였으며, 그 결과 제안한 방법의 타당성과 성능 및 실용가치가 있음을 확인 하였다.

본 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구한 논문입니다. (No. 2013011487)

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. G031454511)

References

- [1] IEEE std. 519-1992-IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems - IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society.
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and Control of an LCL-filter based Three-phase Active Rectifier," *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. 41, No. 5, 2005.
- [3] Weimin Wu, Yuanbin He, and Frede Blaabjerg, "An LLCL Power Filter for Single-Phase Grid-Tied Inverter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 25, No.2, pp. 782-789, Feb. 2012.
- [4] W. sun, X. Wu, P. Dai, and J. Zhou, "An Over View of Damping Methods for Three-phases PWM Rectifier," in *Proc of IEEE ICIT*, Chengdu, China, pp. 1-5, April 21-24, 2008.
- [5] P. K. Dahono, "A Control Method for DC-DC Converter that has an LCL output filter based on new virtual capacitor and resistor concept," in *Proceedings of PESC'04*, pp. 36-42, 2004.
- [6] V. Blasko and V. Kaura, "A novel control to actively damp resonance in input LC fulter of a three- phase voltage source converter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 33, Mar.-Apr. 1997, Tampa, Florida, pp. 542-550, Oct. 2006.
- [7] Shiyang Tang, Li Peng, Yong Kang, "Active Damping Method Using Grid-Side Current Feedback for Active Power Filters with LCL Filters," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 311-318, May 2011.
- [8] June-Seok Lee, Hae-Gwang Jeong, Kyo-Beum Lee, "Active Damping for Wind Power Systems with LCL Filters Using a DFT," *Journal of Power Electronics*, Vol. 12, No. 2, pp. 326-331, Mar. 2012.
- [9] Byoung-Woong An, Hee-Keun Shin, Hag-Wone Kim, Kwan-Yuhl Cho, Byoung-Moon Han, "Active Damping of LCL filter for Three-phase PWM Inverter without Additional Hardware Sensors," *Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-17, Feb. 2013.



안병웅(安炳雄)

1987년 4월 30일생. 2012년 충주대 제어계측공학과 졸업. 2012년~현재 한국교통대학교원 제어계측공학과 석사과정.



홍창표(洪昌標)

1988년 7월 19일생. 2007년~2014년 2월 한국교통대 제어계측공학과 졸업. 2014년~현재 한국교통대 제어계측공학과 석사과정.



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 1991년~2008년 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 총무이사.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 1993년~2004년 LG전자(주) DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수. 당 학회 편집위원장.



임병국(林炳國)

1951년 1월 17일생. 1978년 숭실대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1972년~1977년 현 지식경제부 기술공무원. 1928년~1987년 수원공업전문대학 조교수. 1987년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수.