# 엘리베이터 회생용 인버터의 고조파 전류저감을 위한 LLCL 필터와 LCL 필터의 성능 비교

안병웅*, 진용신*, 김학원*, 조관열*, 임병국*, 신희근**, 이용규***
한국교통대학교*, 브이씨텍**, 성암전기***

# A Performance Comparison between LLCL and LCL filters to Reduce Harmonic Current of Regeneration Power Inverter for Elevator

Byoung Woong An*, Yong Sin Jin*, Hag Wone Kim*, Kwan Yuhl Cho*, Byung Kuk Lim*, Hee Kuen Shin** , Yong Gue Lee***
Korea National Univ of transportation*, VC Tech**, Sungam***

ABSTRACT

엘리베이터 제동 시 발생하는 인버터 회생 전류는 많은 고조파를 포함하고 있다. 기존의 회생용 인버터는 계통 측 필터로 L필터가 많이 사용되어 왔으나, 고조파를 저감하기 위해서 매우 큰 L값을 요구한다. 하지만 엘리베이터 회생용 인버터는 기 설치된 DC Link 과전압 방지 방전회로가 동작되기 전에 회생을 실시하여야 하므로, 상대적으로 낮은 전압에서 회생되어야 하므로 큰 임피던스를 갖는 L필터를 사용하기 어렵다. 본 논문에서는 엘리베이터 회생용 인버터의 리플저감용 LCL 필터와 최근 제안된 LLCL 필터의 성능을 비교 분석하고 모의해석과 실험을 통해 그 타당성을 입증 하였다.

## 1. 서론

엘리베이터 회생용 인버터란 엘리베이터가 운행될 때 발생되는 에너지를 재활용해 전력 소모를 최소화할 수 있는 인버터이다. 이 인버터는 엘리베이터 제동 시 발생하는 직류전력을 교류전력으로 변환하여 교류계통에 재공급하는 것을 목적으로 하는 장치이다. 과거에 생산된 대부분의 엘리베이터는 제동에 의해 발생되는 회생에너지를 저항을 이용하여 소모시키므로, 손실이 큰 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 기존의 엘리베이터에 그림 1과 같이 회생용 인버터를 적용해 전력 소모를 최소화할 수 있다. 그러나 회생전류에는 많은 고조파를 포함하고 있으며, 계통에 연계된 타 장비에 장애를 발생시키는 원인이 되며 이를 규제하고 있다[1].

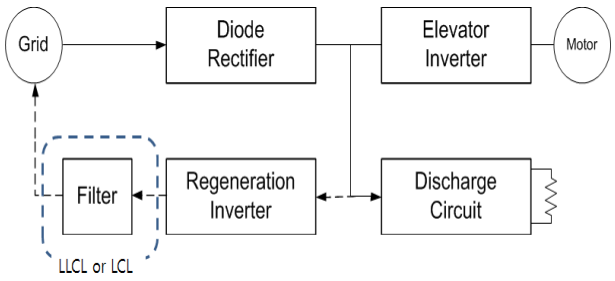
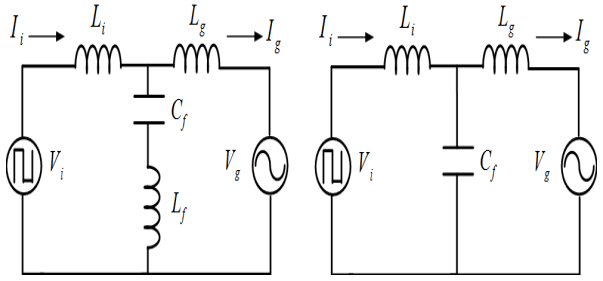



그림 1 회생용 인버터 토플로지
Fig 1. Topology of Regeneration Inverter

한편 고조파를 저감하기 위하여 기존에는 L필터를 사용하였으나, 큰 고조파를 저감하기 위해 상당히 큰 용량의 인덕턴스가 요구된다. 이는 필터의 부피와 가격을 상승시키고, 시스템의 동특성을 나쁘게 한다. 또한 기존의 다이오드 정류기를 가진 엘리베이터에 추가로 설치되는 회생용 인버터는, 기 설치된 DC Link 캐패시터 과전압 보호용 방전회로가 동작되기 전에 회생되어야 하므로 큰 임피던스를 갖는 L필터를 사용하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 LCL 필터를 사용할 수 있다[2]. LCL 필터를 사용할 경우 L단독 필터에 비해 PWM 주파수에 의한 고조파를 저감하기 위한 인덕터의 용량이 작아지므로, 낮은 DC 전압에서도 시스템의 동특성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 한편, 최근에 연구되고 있는 LLCL 필터의 경우 LCL 필터의 캐패시터단에 직렬로 L 을 추가한 형태로, LC 직렬공진을 통하여 PWM 주파수 대역의 고조파를 저감 할 수 있고, LCL 필터에 비해 더 적은 계통측 인덕터를 사용하여 LCL 필터와 유사한 효과를 낼 수 있는 장점이 있다[3]. 본 논문에서는 엘리베이터 회생용 인버터의 리플저감용 LLCL 필터와 LCL 필터를 적용, 모의해석과 실험을 통해 비교 분석 한다.

## 2. LLCL 필터 및 LCL 필터




<a :LLCL> <b :LCL>
그림 2 LLCL 필터 와 LCL 필터의 등가회로
Fig 2. Equivalent LLCL and LCL filters

LLCL 필터는 LCL 필터의 캐패시터단에 직렬로 L 을 추가한 형태로 그림 2의 (a)와 같다. LLCL 필터의 필터 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

1) $L_i$는 전류 리플률과 PWM 주파수, DC Link 전압으로 결정하고 식 (1)과 같다.

$$L_i = \frac{V_{dc}}{4\sqrt{3} f_s \triangle I} \quad (1)$$

2) $C_f$는 전체 전력에 대한 무효전력의 비율로 결정하고 식 (2)과 같다.(일반적으로 5% 이내)

$$C_f = \frac{5\% P_{rated}}{V_i^2 \omega_{\max}} \quad (2)$$

3) $L_f$는 PWM 주파수에서 $C_f$,$L_f$ 직렬 가지의 임피던스가 0이 되도록 결정하고 식 (3)과 같다.

$$L_f = \frac{1}{\omega_{sw}^2 C_f} \quad (3)$$

4) $L_g$는 PWM 2배의 주파수 성분의 감쇄율로부터 결정하고 식 (4)과 같다.

$$\frac{I_g(s)}{I_i(s)} = \frac{1 + s^2 L_f C_f}{s^2 (L_f + L_2) C_f + 1} \quad (s = 2j\omega_{sw}) \quad (4)$$

식 (3)과 같이 캐패시터 직렬 $L_f$설계시 임피던스가 0이 되도록 설계하고, LC공진을 통하여 PWM 주파수에서의 고조파를 감쇠하였다. 이는 그림 3의 주파수 특성을 통해 알 수 있다.

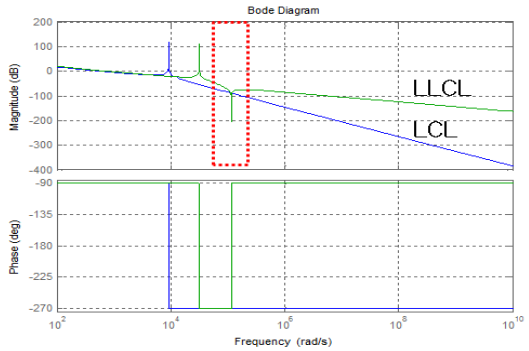


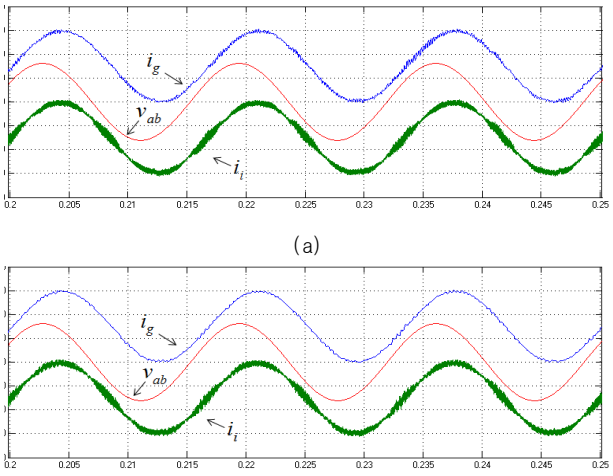

그림 3 LLCL 필터 와 LCL 필터의 주파수 특성
Fig 3. Frequency characteristics of LLCL and LCL filters

## 3. 모의해석 및 실험 결과

표 1 모의해석 및 실험조건
Table 1. Rated condition of simulation and experiment

| 구 분 | | 값 | 단 위 |
|---|---|---|---|
| 정격전력 | | 7.5 | $kW$ |
| 선간전압 | | 380 | $V_{rms}$ |
| 스위칭 주파수 | | 15 | $kHz$ |
| LLCL | $L_i$ | 1.2 | $mH$ |
| | $C_f$ | 7.6 | $\mu F$ |
| | $L_f$ | 10 | $\mu H$ |
| | $L_g$ | 140 | $\mu H$ |
| | $R_d$ | 0.15 | $\Omega$ |
| LCL | $L_i$ | 1.2 | $mH$ |
| | $C_f$ | 7.6 | $\mu F$ |
| | $L_g$ | 800 | $\mu H$ |
| | $R_d$ | 1.5 | $\Omega$ |

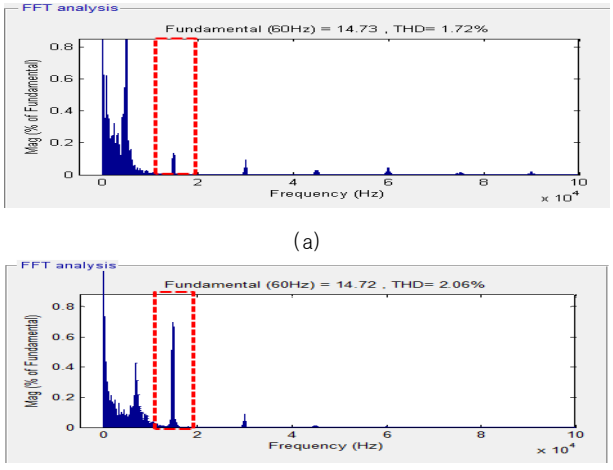
LLCL 필터와 LCL 필터에 대한 엘리베이터 회생용 인버터의 고조파 저감 효과를 비교하기 위한 모의해석 및 실험 조건은 표 1과 같다. LLCL 필터와 LCL를 필터를 적용하여 계통전압, 인버터 전류, 계통 전류에 대하여 모의해석한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 (a)는 LLCL 필터를 적용한 전류파형이고, (b)는 LCL 필터를 적용한 전류 파형이다. 그림 5는 계통측 전류에 대한 FFT해석 결과를 나타내었다. 그림 5의 (a)는 LLCL을 , (b)는 LCL을 적용한 그리드측 FFT 분석 결과이다. 그림 4의 파형을 통해 LLCL 필터와 LCL 필터가 유사한 고조파 감쇠효과를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 모의해석 조건에서도 볼 수 있듯이 더 작은 인덕터 용량으로도 비슷한 고조파 감쇠 효과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다, 또한 그림 5의 FFT분석결과를 보면 LLCL 필터의 스위칭 주파수 대역은, LCL 필터와는 다르게 스위칭 주파수인 15kHz 부분의 FFT 분석결과가 감소한 것을 확인할 수 있다.




(a)

(b)

그림 4 모의해석 결과(파형)
(a) LLCL 필터 (b) LCL 필터
Fig 4. Simulation Result(waveform)
(a) LLCL filter (b) LCL filter

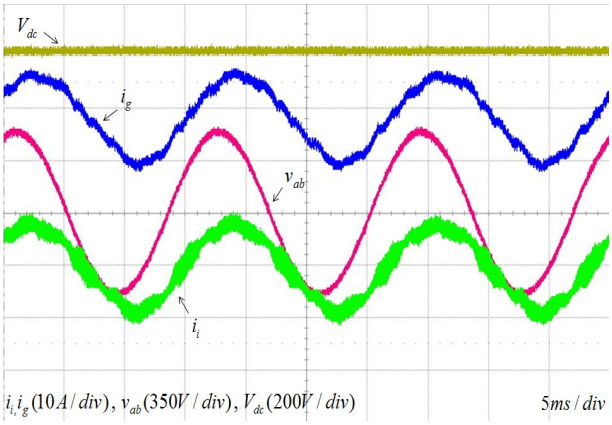



(a)

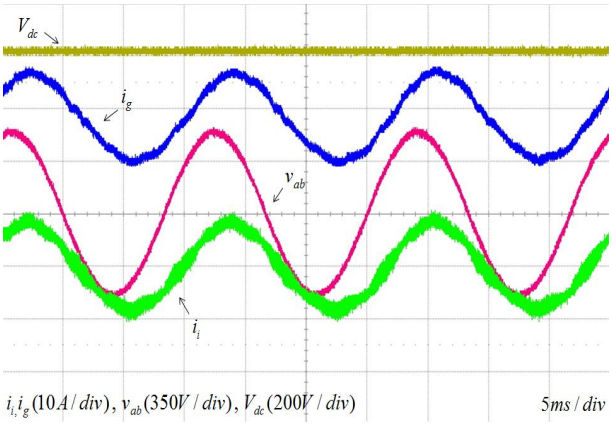
(b)

그림 5 모의해석 결과(FFT)
(a) 출력전류(LLCL) (b) 출력전류(LCL)
Fig 5. Simulation Result(FFT)
(a) Output current(LLCL) (b) Output current(LCL)

LLCL 필터와 LCL 필터의 실제 적용가능성 여부를 확인하기 위해 모의해석과 동일한 조건에서 실험을 실시하였다. 그림 6은 LLCL과 LCL 필터의 실험 파형이다. 실험 파형에 알 수 있듯이 LLCL 필터와 LCL 필터가 유사한 고조파 감쇠효과를 가지는 것을 알 수가 있고, 시뮬레이션 결과 그림 4와 유사한 실험 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 7의 FFT 분석 결과를 보면 스위칭 주파수 대역에서 LLCL필터는 LCL 필터에 비해 좀 더 적게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

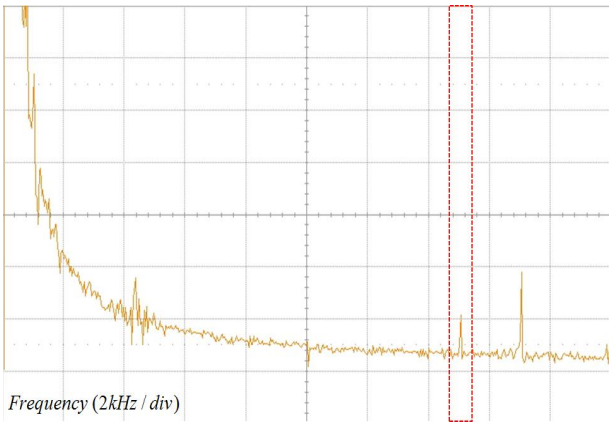



(a)

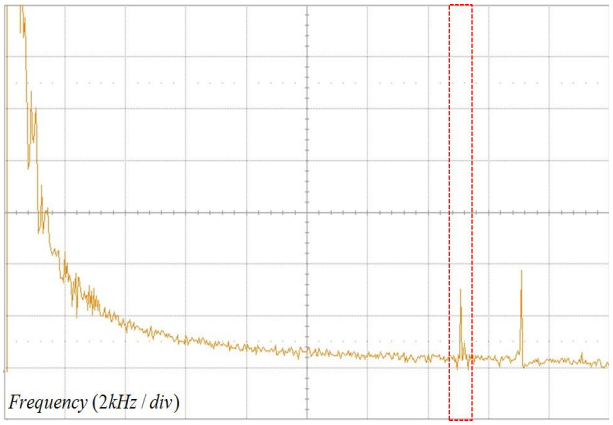



(b)

그림 6 실험 결과(파형)
(a) LLCL 필터 (b) LCL 필터
Fig 6. Experiment Result(waveform)
(a) LLCL filter (b) LCL filter




(a)




(b)

그림 7 실험 결과(FFT)
(a) 출력전류(LLCL) (b) 출력전류(LCL)
Fig 7. Experiment Result(FFT)
(a) Output current(LLCL) (b) Output current(LCL)

## 4. 결론

본 논문에서는 엘리베이터 회생용 인버터의 고조파 전류저감을 위한 LLCL 필터와 LCL 필터의 성능을 비교 하였다. 엘리베이터 회생시 낮은 DC link 전압에서 빠른 동특성 확보를 위해 필터의 임피던스를 낮추어야 하는데 LLCL 필터를 사용해 인덕터의 사이즈를 $800\mu H$에서 $140\mu H$로 약 17.5%줄여 임피던스를 낮추었고, 적은 L의 용량으로도 우수한 고조파 감쇠 효과를 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 FFT분석을 통해 스위칭 주파수에서의 THD감소로 IEEE Std. 519 1992 35차 이상 하모닉 규정에 만족하는 것을 모의해석과 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.


이 논문은 (주)성암전기의 연구비 지원과 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구임. (No.2011H100100110)


## 참 고 문 헌


[1] IEEE std. 519 1992 IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Industry Applications Society/ Power Engineering Socitey.

[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" ,Proceedings of the IEEE, Vol. 27, No. 2, 2012, February.