

온/오프라인 시뮬레이션 툴을 이용한 계통연계형 인버터의 LCL 필터 특성 분석비교

이강, 차한주*
충남대학교 전기공학과

Analytic Comparison of LCL Filter Characteristics of Three-phase Grid-connected Inverter by On/Off-line Simulation Tools

Gang Lee, Hanju Cha*
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

요약 본 논문에서는 계통연계형 인버터용 LCL 필터 특성을 학계와 산업계의 대표적인 오프라인, 온라인 시뮬레이션 도구를 적용하여 LCL 필터와 L 필터의 차이점을 비교 분석하였다. 논문의 연구방법은 비교 분석 및 검증 방법을 적용하여 먼저 LCL 필터를 포함한 계통연계형 인버터 시스템의 수학적 분석과 모델링한 후 오프라인 시뮬레이션 도구로 시뮬레이션한 결과를 수학적 이론값과 비교하였으며, 마지막으로 실시간 시뮬레이터를 사용한 실험을 통한 검증과정으로 구성하였다. 3개의 시뮬레이션 툴을 사용하여 LCL 필터를 모델링 및 시뮬레이션하고 LCL 필터의 고주파 고조파에 대해 필터링 효과를 확인하였다. 먼저, LCL 필터의 전달 함수와 관련 수식을 소개하였으며, 이를 바탕으로 보드선도로 그 특성을 분석하였다. 또한 LCL 필터의 매개 변수에 따라 PSIM 및 MATLAB의 오프라인 시뮬레이션과 FFT를 통해 필터 특성을 확인하였다. 마지막으로 실시간 시뮬레이터인 Typhoon HIL402와 DSP 제어기를 연결하여 온라인 시뮬레이션 결과와의 일관성을 확인하였으며 LCL 필터의 필터링 특성을 시험으로 검증하였다.

Abstract The characteristics of the LCL filter for grid-connected inverters have been discussed in academia and industry. An online simulation tool was applied to compare and analyze the difference between the LCL filter and L filter. LCL filters were modeled and simulated using a range of professional simulation simulators, and the LCL filters were found to have good filtering effects for high-frequency harmonics. First, this paper summarizes the transfer functions of the LCL filter and provides the Bode plot diagram. The accuracy and validity of the filter attenuation characteristics were confirmed by a fast Fourier transform based on off-line simulation tools, such as PSIM and MATLAB, depending on the given parameters of the LCL filter. Finally, the Typhoon HIL402 real-time simulation was performed for hardware in the loop simulation to verify the actual filtering characteristics of the LCL filter.

Keywords : LCL filter, Transfer function, Hardware in the loop simulation, Off-line simulation, Grid connected converter

이 연구는 충남대학교 연구장려장학금에 의해 지원되었음.

*Corresponding Author : Hanju Cha(Chungnam National University)

email: hjcha@cnu.ac.kr

Received August 10, 2020

Revised September 9, 2020

Accepted December 4, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

최근까지 주요 에너지는 석탄, 석유 및 천연 가스와 같은 화석 에너지였으나, 화석 에너지를 태울 때 많은 양의 이산화탄소, 이산화황 및 기타 배기 가스가 지구 온난화와 대기 오염의 주요 원인이므로 새로운 깨끗한 에너지원을 찾는 것이 요구되고 있다. 수력, 풍력, 태양광 등 신재생 에너지원의 개발과 사용은 화석 에너지 부족과 환경 피해 문제를 해결하기 위해 널리 주목받고 있으며, 많은 국가들이 태양 에너지 사용에 특별한 주의를 기울이고 있다. 반면 태양 에너지를 근간으로 하는 신재생 에너지 마이크로그리드는 에너지를 저장할 수 없다. 따라서 에너지 저장 기술 시장의 확대가 필요하며, 특히 배터리 에너지저장 시스템(BESS)은 상당한 주목을 받고 있다. 배터리 기술이 빠르게 발전하고 있고, 리튬 이온 배터리 가격이 계속 하락함에 따라 가격 경쟁에서 우위를 점할 것으로 기대되기 때문이다[1-3]. 분산전원 시스템에는 주로 PWM 인버터라고 하는 PWM (Pulse Width Modulation) 스위치가 있는 전력 반도체를 기반으로 하는 전압 소스 인버터(VSI)가 장착되어 있다. 일반적으로 PWM 인버터는 고정 기준 프레임 또는 동기 기준 프레임[4]에서 전류 제어를 수행한다. 고주파 스위칭으로 인해 PWM을 사용하면 필연적으로 전압 및 전류 왜곡이 발생한다. 따라서 PWM 인버터는 더 높은 고조파를 제한하기 위해 수동 전력 필터가 필요하며, 과거에는 대부분의 PWM 인버터가 주로 L 필터를 사용했다. 최근에는 LCL 필터의 경량화, 소형화, 저 설계비용 등 많은 장점으로 인해 L 필터에 비해 고차 저역 통과 필터의 스위칭 리플이 대폭 감소하여 사용량이 급증하고 있다[5]. 하지만, 많은 장점에도 불구하고 LCL 필터가 있는 인버터는 수동 부품 간에 트리거 되는 공진 문제로 인한 전류를 조정하는 데 큰 어려움이 있다[6]. 일부 논문에서는 계통 측 전류[7] 또는 인버터 측 전류[8]를 제어할 때 필터 설계의 고유한 댐핑 효과를 이용하여 필터 공진을 효과적으로 방지하였다. 본 논문에서는 이와 같이 분산전원에 연결된 계통연계형 인버터 출력단에 위치한 LCL 필터 특성을 대표적인 오프라인 시뮬레이션 툴인 Matlab/simulink와 Psim을 사용하여 비교 분석하였으며, 산업계에서 널리 사용되는 온라인 실시간 시뮬레이션 툴인 Typoon사의 HIL 402 시스템을 DSP 제어기와 연결하여 그 결과를 검증하였다.

2. 계통연계형 인버터 LCL 필터 특성

2.1 3상 계통연계형 인버터 구조

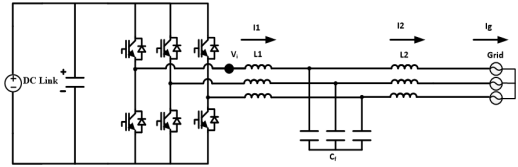


Fig. 1. Structure of LCL filter inverter

본 논문에서는 LCL 필터가 있는 3상 계통연계형 인버터를 사용하며 기본 구조는 Fig. 1과 같으며, DC 전압원, DC 링크 커패시터, 3상 2레벨 인버터, LCL 필터, 3상 계통의 순서로 구성된다.

2.2 LCL 필터 특성

분산전원 시스템에서 LCL 필터의 저항 성분을 무시하고, LCL 필터 앞단 전류 (I_1), 뒷단 전류 (I_2) 및 인버터 출력 전압 V_i 의 비를 통하여, LCL 필터의 전달함수를 나타내는 Eq. (1)과 (2)를 얻을 수 있다.

$$G_1 = \frac{I_1}{V_i} = \frac{1}{sL_1} \cdot \frac{s^2 + Z_{LC}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (1)$$

$$G_2 = \frac{I_2}{V_i} = \frac{1}{sL_1} \cdot \frac{Z_{LC}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (2)$$

$$\omega_{res}^2 = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C_f}} \quad (3)$$

$$Z_{LC} = \sqrt{\frac{1}{L_1 \cdot C_f}} \quad (4)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C_f}} \quad (5)$$

수학적 모델을 만들기 위해 위에 MATLAB을 이용하여 LCL 필터의 필터링 효과에 대한 보드 선도를 얻을 수 있으며, Fig. 2는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 얻어낸 LCL 필터 전후의 전류에 대한 보드 선도이다. LCL 필터 전후의 전류에 대한 전달함수 G_1 , G_2 를 비교하면, LCL 필터의 공진 주파수 f_r 를 기준으로 차이가 나타나는데, 공진 주파수보다 낮은 주파수 대역에서는 모두 -20dB/dec로 기울기의 차이가 없다. 반면 LCL 필터의 공진 주파수보다 높은 주파수 대역에서는 G_1 이 -

60dB/dec의 기울기를 가지며, G_2 가 -40dB/dec의 기울기를 갖게 되어 감쇠 크기에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 LCL 필터 뒷단의 전류를 이용해 인버터를 제어하였으며, LCL 필터 뒷단 전류는 공진 주파수에서 위상이 -180°로 변경된다는 특성이 있다.

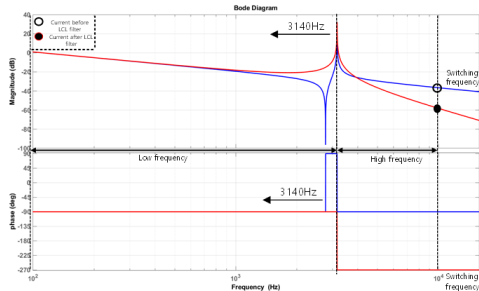


Fig. 2. LCL filter transfer function board diagram

3. 계통연계형 인버터 오프라인 시뮬레이션 모델링 및 검증

3장의 시뮬레이션은 오프라인 시뮬레이션 프로그램인 PSIM과 MATLAB을 이용해 진행하였다. 본 논문에서 LCL 필터가 있는 3상 계통연계형 인버터의 모델링에 사용된 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1. Grid-connected inverter modeling parameters

Parameters	
DC Voltage(Vdc)	500V
Switching frequency(fs)	10kHz
L1 filter(L1)	1.1mH
C filter(C)	10uF
L2 filter(L2)	0.33mH
Sampling time(Ts)	1us
Grid voltage(Vg)	220V
Grid frequency(f)	50Hz

3.1 PSIM 시뮬레이션

3.1절에서는 오프라인 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 사용하여 LCL 필터가 있는 3상 계통연계형 인버터에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. PSIM 시뮬레이션은 전력전자 회로 및 제어 시스템 설계용으로 개발된 시뮬레이션 프로그램으로, 전력전자 분야에서 대중적으로 많이 사용되는 프로그램이다. Fig. 3은 PSIM을 통해 구현된 3

상 계통연계형 인버터의 회로 구조를 나타내는 것으로, DC 전압원과 3상 2레벨 인버터, LCL 필터, 3상 계통으로 구성되어 있다. PSIM 시뮬레이션을 통해 3상 계통연계형 인버터가 계통에 연결된 경우 LCL 필터의 효과 및 특성을 검증하였다. 시뮬레이션의 정확성을 보장하기 위해 Table 1의 파라미터를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4 (a) 및 Fig. 4 (b)는 각각 LCL 필터 앞단의 전류와 뒷단의 전류를 나타내는 파형이다. LCL 필터 앞단 전류의 경우 Fig. 4 (a)를 통해 확인할 수 있듯이 출력 전류에 고조파 리플 성분이 포함되는 것을 알 수 있다.

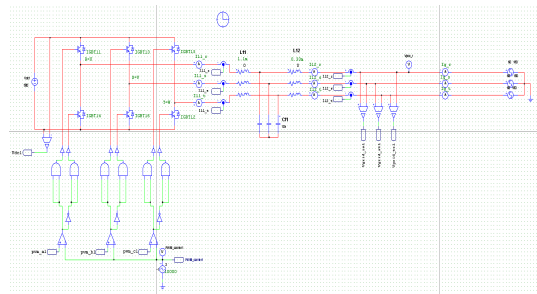


Fig. 3. Three-phase grid-connected inverter PSIM circuit structure

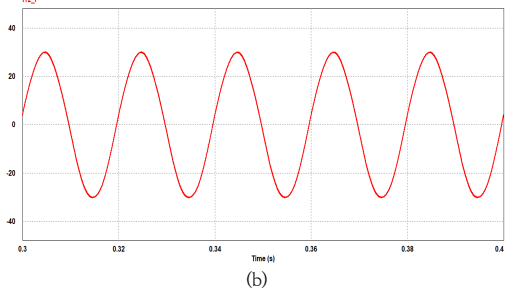
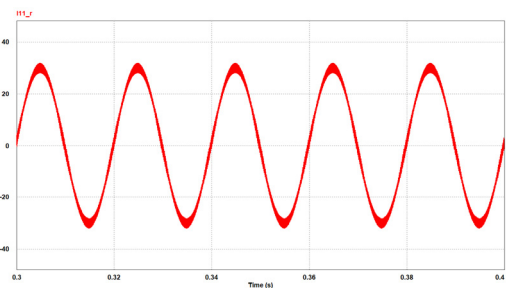


Fig. 4. PSIM simulation results (a) Current waveform at the front end of the LCL filter, (b) Current waveform at the rear end of the LCL filter

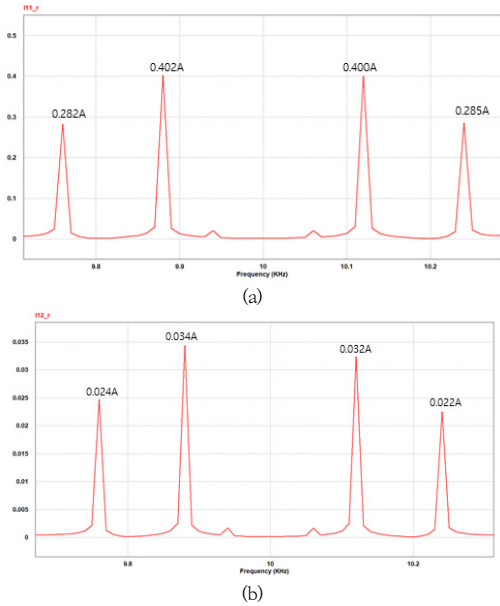


Fig. 5. (a) LCL filter front end current FFT result, (b) LCL filter rear end current FFT result

반면, LCL 필터 뒷단 전류를 나타내는 Fig. 4 (b)를 보면 Fig. 4 (a)에 비해 출력 전류의 리플이 훨씬 감소된 것을 알 수 있다. Fig. 5는 LCL 필터 앞단과 뒷단의 전류를 스위칭 주파수 대역에서 FFT한 결과이다. 9.88kHz의 값을 기준으로 하였을 때, Fig. 5 (a)를 보면 FFT 결과가 0.402A인 것에 비해 Fig. 5 (b)를 보면 FFT 결과가 0.034A로 LCL 필터 앞단의 전류에 비해 LCL 필터 뒷단 전류의 스위칭 리플의 크기가 91.54% 감소한 것을 확인할 수 있다.

3.2 MATLAB 시뮬레이션

3.2절에서는 MATLAB/SIMULINK를 사용하여 3상 계통연계형 인버터의 LCL 필터 특성을 검증 하였다. MATLAB/SIMULINK는 수치 분석, 행렬 계산, 과학 데이터 시각화, 비선형 동적 시스템 모델링 및 시뮬레이션과 같은 많은 강력한 기능을 사용하기 쉬운 창 환경에서 통합하며, 효과적인 수치 계산이 필요한 과학 연구, 엔지니어링 설계 및 많은 분야에 사용된다. 시뮬레이션의 비교 분석을 위해 PSIM과 동일하게 Table 1의 파라미터를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, Fig. 6은 MATLAB/SIMULINK로 구현된 3상 계통연계형 인버터의 구조를 보여준다.

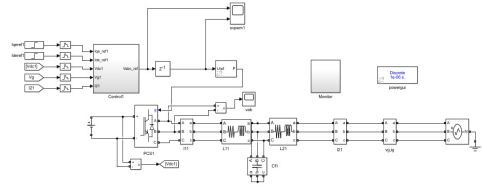


Fig. 6. Three-phase grid-connected inverter MATLAB circuit structure

Fig. 7 (a)와 Fig. 7 (b)는 MATLAB을 이용한 시뮬레이션 결과 파형으로, 각각 LCL 필터 앞단의 전류와 뒷단의 전류 파형을 보여준다. LCL 필터 앞단 전류의 경우 Fig. 7 (a)와 같이 출력 전류에 고조파 리플 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 반면 LCL 필터 뒷단 전류의 경우 Fig. 7 (b)와 같이, Fig. 7 (a)에 비해 출력 전류의 리플이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

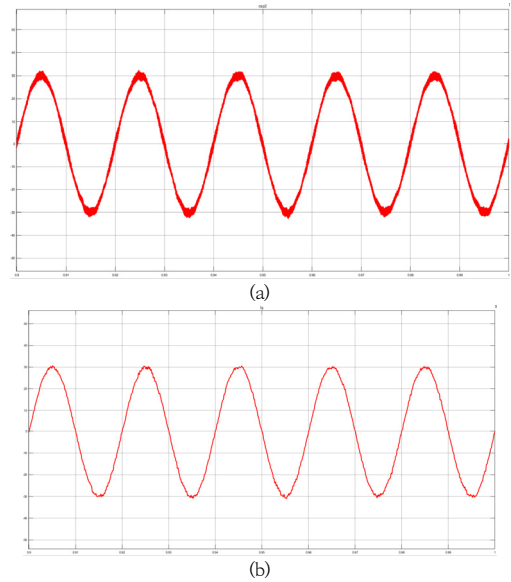


Fig. 7. MATLAB simulation results (a) Current waveform at the front end of the LCL filter, (b) Current waveform at the rear end of the LCL filter

Fig. 8은 스위칭 주파수 대역에서 LCL 필터의 전후단 전류를 FFT한 결과이다. PSIM과 마찬가지로 9.88kHz의 값을 기준으로 하였을 때, Fig. 8 (a)를 보면 LCL 필터 앞단의 전류 FFT 결과가 0.423A로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 8 (b)에서는 FFT 결과가 0.034A로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를

통해 LCL 필터 앞단의 전류보다 LCL 필터 뒷단 전류의 스위칭 리플의 크기가 91.96% 감소하여 PSIM과 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있다.

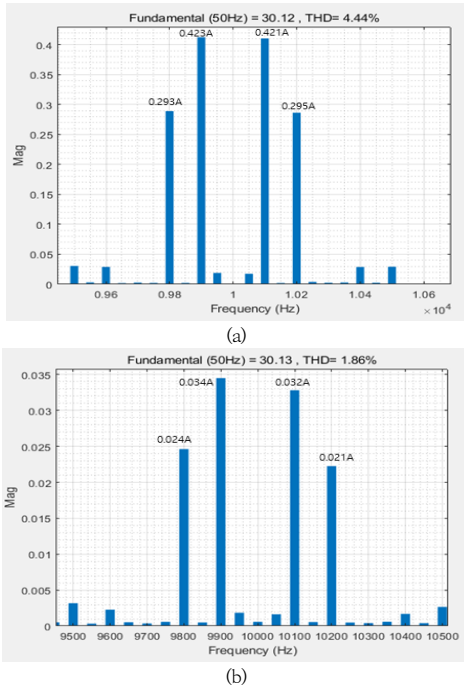


Fig. 8. MATLAB simulation results (a) LCL filter front end current FFT result, (b) LCL filter rear end current FFT result

4. HILS 기반 온라인 시뮬레이션 검증

HILS (Hardware In the Loop Simulation)는 복잡한 실시간 시스템의 개발 및 시험에 사용되는 기술로서, 실제 제어를 사용하여 모의 실험을 진행할 수 있으며, 이를 통해 온라인으로 실시간 제어를 검증할 수 있다. 본 논문에서는 Typhoon HIL402 장비와 DSP TMS320F28377D를 사용하여 제어보드 연동을 통해 3상 계통연계형 인버터의 LCL 필터 특성을 실험하였으며, 분석결과와 동일한 실험결과를 도출함으로써 해석의 타당성을 검증하였다. Fig. 9 (a)와 Fig. 9 (b)는 HILS 시스템의 구조도와 실제 장비 세팅을 보여주며, Fig. 10은 LCL 필터를 사용하는 3상 계통연계형 인버터의 회로 구조이다.

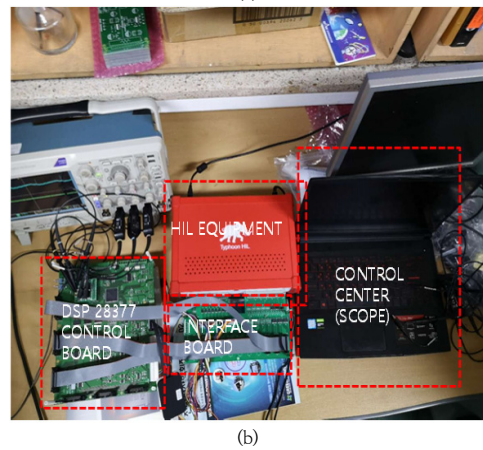
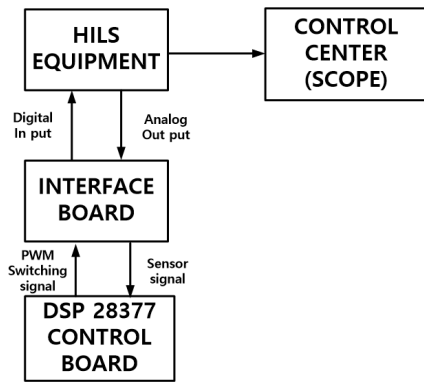


Fig. 9. HILS system configuration (a) HIS system structure (b) Experiment setting

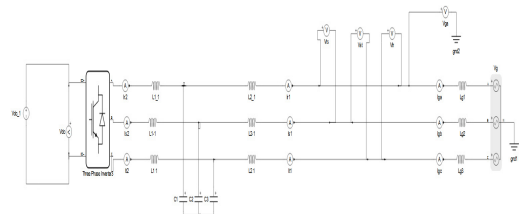


Fig. 10. Three-phase grid-connected inverter HILS circuit structure

4장에서는 앞선 오프라인 시뮬레이션 프로그램들의 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 실시간 온라인 시뮬레이션 프로그램인 HILS를 이용하여 3상 계통연계형 인버터의 LCL 필터의 특성을 검증하였다. 동일한 조건에서의 비교분석을 위해 Table 1의 파라미터를 사용하였으며, Fig. 11은 HILS를 이용한 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다. Fig. 11 (a)를 보면, LCL 필터 앞단의 출력

전류에 고조파 리플 성분이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 11 (b)를 보면, LCL 필터 뒷단의 출력 전류가 앞단의 출력 전류에 비해 리플 성분이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 각각의 출력 전류를 스위칭 주파수 대역에서 FFT한 결과를 나타내는 것이다. 3장의 오프라인 시뮬레이션과 마찬가지로, 9.88kHz를 기준으로 하였을 때, Fig. 12 (a)를 보면, 0.406A로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 12 (b)에서는 FFT 결과가 0.0098A로 나타나는 것을 통해 전류의 스위칭 리플 크기가 97.58% 감소하여 오프라인 시뮬레이션의 결과와 유사한 것을 확인할 수 있다.

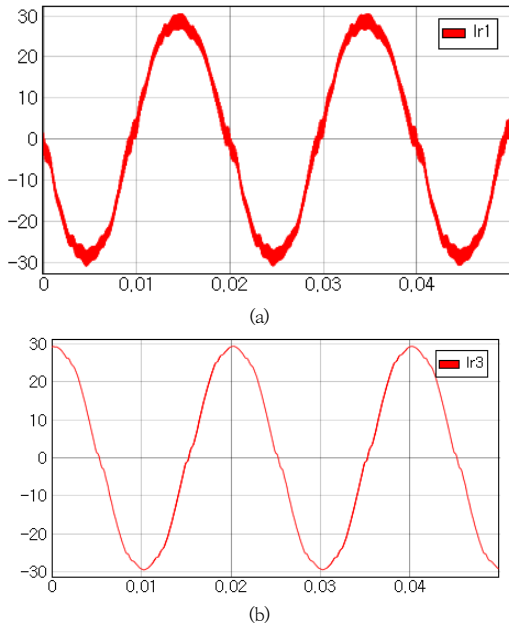


Fig. 11. HILS simulation results (a) Current waveform at the front end of the LCL filter, (b) Current waveform at the rear end of the LCL filter

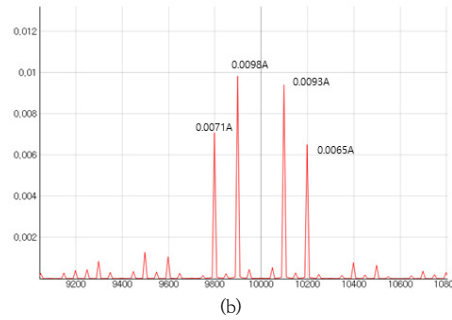
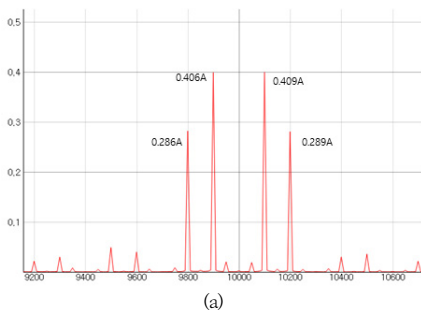


Fig. 12. HILS simulation results (a) LCL filter front end current FFT result, (b) LCL filter rear end current FFT result

Table 2는 LCL 필터 앞단의 전류와 뒷단의 전류에 대해 2장에서 분석한 보드 선도, 3장의 오프라인 시뮬레이션 결과 및 4장의 온라인 시뮬레이션 결과를 정리하여 나타내고 있다. Table 2의 결과를 통해 보드 선도의 분석에 맞게 오프라인 시뮬레이션과 온라인 시뮬레이션의 결과가 모두 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. LCL filter characteristic analysis result

Analysis method	Board diagram	PSIM	MATLAB	HILS
LCL filter front end current	-40dB/d ec	0.402A	0.423A	0.406A
LCL filter rear end current	-60dB/d ec	0.034A	0.034A	0.0098A

5. 결론

본 논문은 분산 전원에 사용되는 3상 계통연계형 인버터의 LCL 필터 전달함수를 통해 필터링 특성을 분석하고 LCL 필터의 필터링 방법 및 필터링 특성을 오프라인 및 온라인 시뮬레이션 프로그램을 통해 비교분석 및 검증하였다. 본 논문은 다양한 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 결과를 분석하고 LCL 필터의 필터링 효과를 비교하여 시뮬레이션 실험과 이론적 분석의 일관성과 정확성을 보장했다. LCL 필터를 사용하는 3상 계통연계형 인버터 조건에서 LCL 필터 전후의 전류를 MATLAB/SIMULIK를 이용하여 보드선도를 통해 분석하였으며, 그 결과 LCL 필터 앞단 전류의 감쇠비가 -40dB / dec, 뒷단의 전류가 -60dB / dec인 결과를 얻

었다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 오프라인 시뮬레이션 프로그램인 PSIM 및 MATLAB / SIMULINK를 사용하여 분산전원 시뮬레이션을 구축하였으며, 실시간 온라인 시뮬레이션 프로그램인 HILS를 이용하여 동일한 조건에서의 시뮬레이션 수행을 통해 LCL 필터의 전류 리플 특성을 검증하였다. 따라서 분산전원의 안정성 분석과 온-오프라인의 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인하였다.

References

- [1] J. Li, Y. Liu, and L. Wu, "Optimal Operation for Community-Based Multi-Party Microgrid in Grid-Connected and Islanded Modes," IEEE Trans. Smart Grid, vol.9, no. 2, pp. 756-765, mar. 2018
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/7468543>
- [2] G. C. Karyonidis, E. O. Kontis, A. I. Chrysochos, K. O. Oureilidis, C. S. Demoulias, and G. K. Papagiannis, "Power Flow of Islanded AC Microgrids: Revisited," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 3903-3905, Jul. 2018.
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/8272027>
- [3] R. J. Wai, C. Y. Lin, Y. C. Huang, and Y. R. Chang, "Design of High-Performance Stand-Alone and Grid-Connected Inverter for Distributed Generation Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1542-1555, Apr. 2013.
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/6290376>
- [4] D. G. Holmes, T. A. Lipo, B. P. McGrath, and W. Y. Kong, "Optimized Design of Stationary Frame Three Phase AC Current Regulators," IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 11, pp. 2417-2416, Nov. 2009
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/5338054>
- [5] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, Sep./Oct. 2005.
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/1510826>
- [6] S. Jayalath, and M. Hanif, "Generalized LCL-Filter Design Algorithm for Grid-Connected Voltage-Source Inverter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 3, pp. 1905-1915, Mar. 2017.
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/7605401>
- [7] S. G. Parker, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "Regions of Active Damping Control for LCL Filters," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 1, pp. 424-432, Jan./Feb. 2014.
DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/6342412>
- [8] Y. Tang, C. Yoon, R. Zhu, and F. Blaabjerg, "Generalized Stability Regions of Current Control for LCL-Filtered Grid-Connected Converters without Passive or Active Damping," in Proc. IEEE Energy Convers. Cong. Expo., Montreal, QC, CANADA, 2015,

pp. 2040-2047.

DOI:<https://ieeexplore.ieee.org/document/7309948>

이 강(Gang Lee)

[준회원]



- 1994년 6월 10일생.
- 2013년 : 창저우 사범 대학교 전기 공학 및 자동화 졸업.
- 2018년 ~ 현재 : 충남대 전기공학과 석사과정.

<관심분야>

전력전자, 동기기 모델링, PCS 모델링 및 제어

차 한 주(Hanju Cha)

[정회원]



- 1988년 : 서울대 전기공학과 졸업.
- 1990년 : 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사).
- 1990 ~ 2001 : LG산전연구소 책임연구원.
- 2004년 : 미국 Texas A&M University, College station(공박).
- 2009년 : 미국 United Technology Research Center 방문교수.
- 2005년 ~ 현재 : 충남대 전기공학과 교수.

<관심분야>

스마트그리드, 산업전력전자, 분산전원 모델링 및 안정도 해석, 전력전자의 국내외 표준활동