

계통연계형 인버터의 고조파 전류저감을 위한 LLCL 필터에 관한 연구

홍창표*, 안병웅*, 김학원*, 조관열*, 임병국*, 신희근**
한국교통대학교*, 브이씨텍**

A Basic study on the LLCL filter to Reduce Harmonic Current of Grid Connected Power Inverter

Chang Pyo Hong*, Byoung Woong An*, Hag Wone Kim*, Kwan Yuhl Cho*, Byung Kuk Lim*, Hee Kuen Shin**
Korea National Univ of Transportation*, VC Tech**

ABSTRACT

계통 연계형 인버터에는 고조파 전류 저감을 위한 필터를 필요로 한다. 고조파 저감을 위한 필터로는 LCL 필터가 주로 사용되고 있다. 하지만 최근에 연구되고 있는 LLCL 필터의 경우 LCL 필터의 캐패시터 단에 직렬로 L을 추가한 형태로 LC 직렬공진을 통하여 LCL 필터에 비해 PWM 주파수 대역의 고조파를 좀 더 효과적으로 저감 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 기존연구에서는 LLCL 필터의 공진을 억제하기 위한 댐핑 방법 및 효과가 고려되어 있지 않다. 본 논문에서는 PWM 주파수 고조파 저감효과는 댐핑저항이 없는 경우와 동일한 효과를 얻으면서, LLCL 필터의 공진을 효과적으로 억제하는 LLCL 필터를 제안하고, 그 타당성을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

1. 서론

3상 PWM 인버터의 출력 전류에 포함되는 전류의 고조파 성분은 계통에 연계된 타 장비에 장애를 일으키는 원인이 되며 이를 규제하고 있다^[1]. 이러한 고조파를 저감하기 위하여 작은 필터 용량으로도 우수한 고조파 저감효과를 갖는 LCL 필터가 주로 사용되는 추세이다^[2]. 하지만 LCL 필터의 경우 PWM 주파수 대역에서의 고조파 저감 효과를 얻기 힘들고 이는 특정 규제를 만족하기 어렵다. 한편, 최근에 연구되고 있는 LLCL 필터의 경우 LCL 필터의 캐패시터 단에 직렬로 L을 추가한 형태로, LC 직렬 공진을 통하여 LCL 필터에 비해 PWM 주파수 대역의 고조파를 좀 더 효과적으로 저감 할 수 있고, LCL 필터에 비해 더 적은 계통 측 인덕터 용량으로도 LCL 필터와 유사

한 효과를 낼 수 있어, 부피 저감 및 빠른 동특성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다고 보고된 바 있다^[3]. 그러나 LCL 필터 및 LLCL 필터를 갖는 인버터 시스템은 기존의 L 필터와는 다르게 LC가 추가됨으로 인하여 임피던스가 0이 되는 주파수가 존재하고, 이로 인한 필터의 공진 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 캐패시터에 직렬로 저항을 연결하는 수동댐핑(Passive Damping)방법이 주로 사용되고 있다. 하지만 기존의 논문에서 제안한 LLCL 필터의 경우 기존의 수동댐핑을 적용할 경우 PWM 대역의 고조파 저감을 위한 LC 직렬공진 효과 또한 감소하여 PWM 주파수 대역의 고조파 저감효과를 얻기 힘들다. 본 논문에서는 PWM 주파수 고조파 저감 효과는 댐핑 저항이 없는 경우와 동일한 효과를 얻으면서, LLCL 필터의 공진을 효과적으로 억제하는 LLCL 필터를 제안하고, 그 타당성을 실험 및 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

2. 수동댐핑이 적용 가능한 LLCL 필터

2.1 기존 LLCL 필터의 문제점

LCL 필터 및 LLCL 필터를 갖는 인버터 시스템은 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. 일반적으로

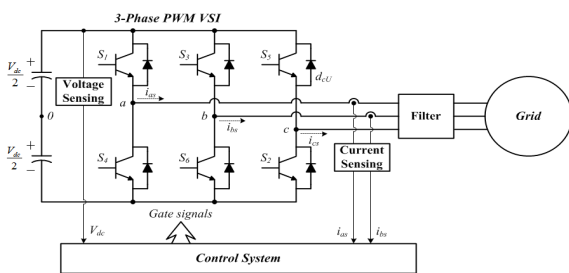


그림 1 계통 연계형 3상 PWM 인버터
Fig. 1 General configuration of grid connected three-phase PWM inverter

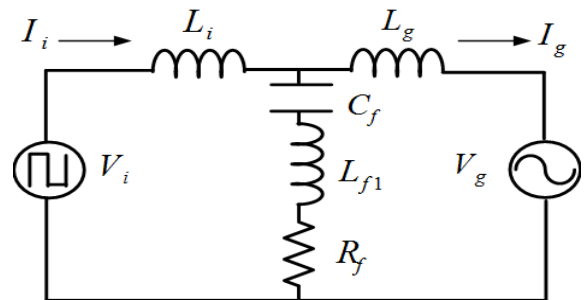


그림 2 LLCL 필터
Fig. 2 LLCL filter circuit

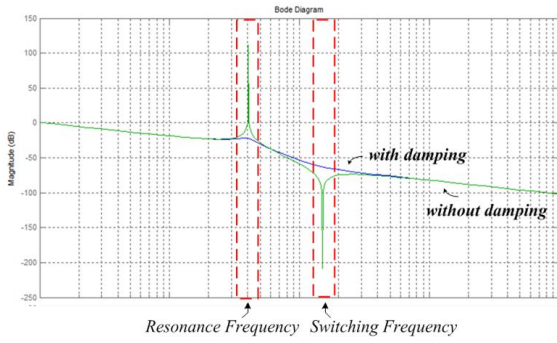


그림 3 LLCL 필터의 주파수 특성
Fig. 3 Frequency characterist of LLCL filter

수동댐핑 방법을 사용하는데 수동댐핑 방법은 필터 캐패시터에 직렬 또는 계통 인덕터와 병렬로 저항을 연결하는 간단한 방법으로 LC에 의한 공진 문제를 해결할 수 있다. 수동댐핑 방법의 경우 LCL 필터에는 쉽게 적용 가능 하지만, LLCL 필터의 경우 제약이 따른다. 수동댐핑 방법이 LLCL 필터에 미치는 영향을 확인하기 위해 인버터 전압에 대한 계통 측 전류 응답의 전달함수를 구하면 식(1)과 같다.

$$\frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{L_f C_f s^2 + C_f R_f s + 1}{(L_i L_g C_f + Z L_f C_f) s^3 + C_f R_f Z s^2 + Z s} \quad (1)$$

여기서 $Z = (L_i + L_g)$ 이다.

식 (1)을 이용해 수동댐핑 방법에 대한 LLCL 필터의 주파수 특성 보드선도를 그리면 그림 3과 같이 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 공진 문제를 해결하기 위한 수동댐핑에 의해 공진 주파수에서의 공진 문제는 억제 된 것을 볼 수 있지만, LLCL 필터의 특징인 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과 역시 댐핑 저항에 의해 억제 되는 것을 확인 할 수 있다.

2.2 제안하는 새로운 LLCL 필터

그림 4는 제안한 새로운 LLCL 필터이다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 일반적인 LLCL 필터의 경우 수동댐핑 방법을 사용하기 쉽지 않다. 제안한 새로운 수동 댐핑 방법은 기존의 필터 캐패시터와 병렬로 LC직렬 가치를 연결한 형태이다. 필터 캐패시터와 댐핑 저항이 직렬로 연결된 가지는 공진을 억제하는 효과를 얻고, 이와 병렬로 연결된 LC 직렬 가지는 LC 직렬 공진을 이용해 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과를 얻을 수 있다. 제안하는 LLCL 필터의 주파수 특성을 알아보기 위해 인버터 전압에 대한 계통측 전류 응답의 전달함수를 구하면 식(2)와 같다. 식(2)를 이용해 수동댐핑 방법에 대한 LLCL 필터의 주파수 특성 보드선도를 그리면 그림 5와 같이 된다.

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

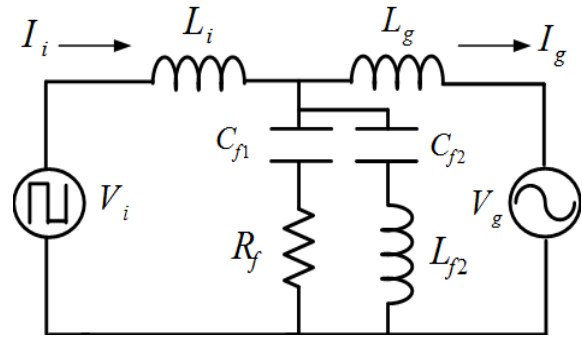


그림 4 제안하는 LLCL 필터
Fig. 4 Proposed method of LLCL filter circuit

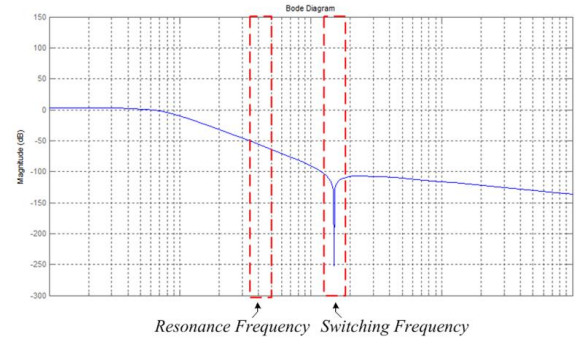


그림 5 제안하는 LLCL 필터의 수동댐핑 방법
Fig. 5 Frequency characterist of Proposed method of LLCL filter

그림 5에서 볼 수 있듯이 기존의 LLCL 필터의 수동댐핑 방법과는 다르게 제안한 수동댐핑 방법이 공진주파수에서는 공진 억제 효과를 가지면서 병렬로 연결된 LC직렬 가치의 공진을 방해하지 않아 PWM 주파수 대역에서의 고조파 감쇄 효과를 갖는 것을 확인 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

기존의 LLCL 필터와 제안하는 방법의 LLCL 필터의 공진 억제와 PWM 주파수 대역에서의 고조파 저감효과를 비교하기 위한 모의해석 조건은 표 1과 같다. 기존의 LLCL 필터와 제안하는 방법의 LLCL 필터에 각각 수동댐핑을 적용하여 그리드측 전류의 FFT 분석 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 (a)는 기존의 LLCL 필터에 필터 캐패시터에 직렬로 저항을 연결하는 수동댐핑 방법을 적용한 시뮬레이션 결과이고, (b)는 제안하는 LLCL 필터에 수동댐핑 방법을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 그림 6의 (a)에서 알 수 있듯이 기존의 LLCL 필터에 수동댐핑 방법은 공진 주파수에서의 공진 문제를 해결하기 위한 저항으로 인해 공진 주파수 대역에서의 공진문제는 감소한 것을 확인할 수 있지만, 댐핑저항으로 인해 LC직렬 공진 효과 또한 감소

4. 결론

표 1 모의해석 및 실험조건

Table 1. Rated condition of simulation and experiment

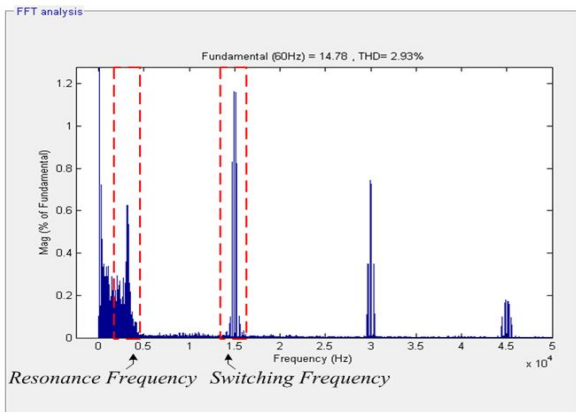
구분	값	단위	
Line to line Voltage	380	V_{rms}	
Switching Frequency	15	kHz	
Resonance Frequency	3.9	kHz	
LLCL	L_i	1.2	mH
	C_{f1}	6.85	μF
	C_{f2}	0.75	μF
	L_{f1}	16.5	μH
	L_{f2}	150	μH
	L_g	254	μH
	R_d	1	Ω

본 논문에서는 계통 연계형 인버터의 고조파 전류저감을 위한 새로운 LLCL 필터에 대해 제안하였다. 기존의 LLCL 필터의 경우 공진문제의 역제를 위한 수동댐핑 시 LLCL 필터의 스위칭 고조파 감쇄효과를 얻지 못한다는 단점을 가지고 있는데 이러한 단점을 해결하고자 새로운 LLCL 필터에 대해 제안하였다. FFT분석을 통해 스위칭 주파수에서의 THD감소로 IEEE Std. 519 1992 35차 이상 하모닉 규정에 만족하는 것을 모의해석을 통해 그 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원통상부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20114010203030, G031454511)

참고 문헌

- [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" ,*Proceedings of the IEEE*, Vol. 27, No. 2, 2012, February.
- [4] 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.
- [5] V. Blasko and V. Kaura, "A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three phase voltage source converter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 33, Mar. Apr. 1997, Tampa, Florida, pp. 542 550, 2006, Oct.
- [6] Hee Keun Shin, Hag Wone Kim, Kwan Yuhl Cho, yung Kuk Lim, "A Current Controller with the Compensation of the Input Voltage Unbalance and Distortion for Three Phase PWM Rectifier," *Transactions of the Korean Insititue of Power Electronics*, Vol. 16, No. 6, pp. 594 601, Dec. 2011.
- [7] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark "Adaptive Control Second Edition, 2008.
- [8] 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 Insititue of Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 10 17, Feb. 2013.



(a)

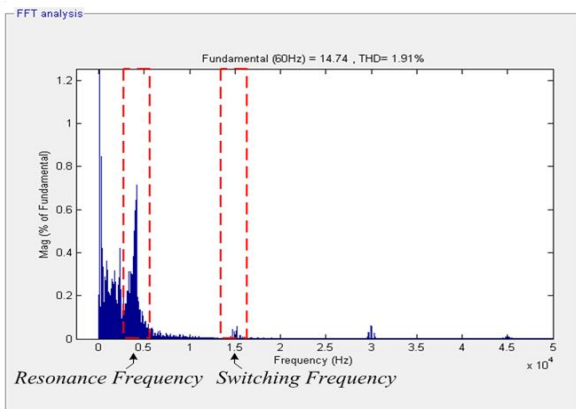


그림 6 시뮬레이션 결과(FFT). (a) LLCL filter. (b) proposed LLCL filter

Fig. 6 Simulation result(FFT). (a) LLCL filter. (b) proposed LLCL filter

하여 PWM 주파수 대역에서의 고조파 저감 효과역시 억제 되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 6의 (b)의 시뮬레이션 결과에서는(a)의 시뮬레이션 결과와는 다르게 제안한 수동댐핑 방법이 공진주파수에서는 공진억제 효과를 가지면서 병렬로 연결된 LC직렬 가지의 공진을 방해하지 않아 PWM 주파수 대역에서의 고조파 저감 효과를 갖는 것을 확인 할 수 있다.