

LCL 필터요소에 의한 공진주파수 변화에 따른 스위칭고조파 감쇄성능 분석

김용중, 김효성

공주대학교 전기전자제어공학부

Analysis of Switching Harmonics Attenuation in Resonance Frequency Variation by Elements of LCL Filter

Yong-Jung Kim, Hyosung Kim

School of EE and control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

LCL 필터는 스위칭 고조파를 저감하는 지역통과필터로써 L 필터에 비해 경제적이며 효과적인 스위칭고조파 감쇄능력을 갖는다. 하지만 LCL 필터는 L 필터에서 존재하지 않은 공진문제를 야기한다. 이러한 LCL 필터의 공진현상은 계통주입전류의 품질을 저하시키고 LCL 필터의 고조파 억제성능을 저하시킬 수 있는 잠재적 요소이다. 최근에는 스위칭 고조파 및 LCL 필터 공진성분 뿐만 아니라 기본과 주파수 부근의 저차 고조파 성분도 계통주입전류를 왜곡시키는 원인의 하나로 밝혀져다. 그러므로 LCL 필터를 설계하기 위해서는 주요 주파수 영역에서의 정확한 필터동작해석이 요구된다. 본 논문은 기본과 주파수, 공진주파수, 스위칭주파수에 대한 L 필터와 LCL 필터의 주파수응답을 통해 필터의 동작을 해석하며, 시뮬레이션을 통해 계통주입전류의 스위칭 고조파 및 저차 고조파를 저감하기 위한 최적의 필터인덕터 비율을 제안한다.

1. 서론

화석연료의 과대한 사용에 따른 온실가스배출은 심각한 기후문제를 야기하고 있으며, 이에 대한 대책으로 친환경 에너지기술이 세계적으로 주목을 받고 있다. 친환경 에너지기술에서 정지전력형 스위치를 사용한 전력변환은 핵심요소이지만, 스위칭 동작에 의한 노이즈는 계통의 전력품질을 악화시키는 필요악적인 요소이다.

계통연계형 인버터와 같은 전력변환기의 스위칭 노이즈를 억제하기 위해 일반적으로 사용되는 필터는 L 필터와 LCL 필터가 있다. L 필터는 1차 지역통과필터의 특징을 갖기 때문에 계통주입전류의 제한 조건을 충족시키기 위해서는 큰 인덕턴스를 필요로 한다. 이는 시스템 응답특성을 느리게 하고 시스템의 부피 및 무게를 증가시키는 원인이 된다. LCL 필터는 LC필터와 L필터가 결합한 3차 지역통과필터의 특징을 갖는다 [1]. 이러한 이유로 LCL 필터는 L 필터보다 작은 크기의 인덕터를 사용하여 효율적인 감쇄성능을 발휘할 수 있다. LCL 필터 적용에 따른 전체 인덕턴스의 감소는 시스템 응답특성을 개선시키고 시스템의 부피 및 무게가 감소하는 장점을 갖는다. 하지만 LCL 필터는 L 필터에 존재하지 않은 공진문제를 야기시켜 계통주입전류의 품질을 저하시키고 LCL 필터의 고조파 억제성능을 저하시킬 수 있다. 이처럼 LCL 필터는 L 필터와 달리 주파수 영역에 따라 상이한 주파수응답을 갖기 때문에, LCL 필터를 설계함에 있어 LCL 필터의 주파수영역에 따른 주파수응답 특성을 이해하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 기본과 주파수, 공진주파수, 스위칭주파수에 대한 L 필터와 LCL 필터의 주파수응답 특성을 비교 분석함으로써 필터의 동작을 해석하며, 시뮬레이션을 통해 계통주입전류의 스위칭 고조파 및 저차 고조파를 저감하기 위한 최적의 인덕터 비율을 제안한다.

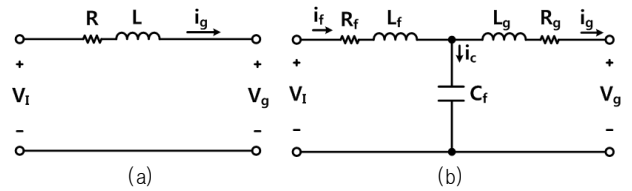


그림 1 필터 구성도: (a) L 필터, (b) LCL 필터

2. L 필터와 LCL 필터의 주파수응답 해석

그림 1은 L 필터와 LCL 필터의 구성도를 나타낸다. 그림 1(a)는 L 필터의 구성도이며, L 은 필터인덕터를 의미하고 R 은 필터인덕터의 직렬내부저항을 의미한다. 그림 1(b)는 LCL 필터의 구성도이며, L_f 는 인버터 측 필터인덕터, L_g 는 계통 측 필터인덕터를 의미하고 R_f, R_g 는 각 인덕터의 직렬내부저항을 의미한다.

$$G(s)_L = \frac{1}{L(s+1/\tau)} \tag{1}$$

$$G(s)_{LCL} = \frac{\frac{1}{L_f L_g C_f}}{\left(s + \frac{1}{\tau}\right) \left(s^2 + \frac{1}{\tau} s + \frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f}\right)} \tag{2}$$

식 (1)은 인덕터 직렬내부저항을 고려한 L 필터의 전달함수이며, 여기서 τ 는 필터인덕터의 시정수를 나타낸다. LCL 필터의 해석에서 인버터 측 필터인덕터의 시정수와 계통 측 필터인덕터의 시정수가 τ 로 동일하다면 인덕터의 직렬내부저항을 고려한 LCL 필터의 전달함수는 식 (2)과 같이 표현할 수 있다. 만일 인덕터 직렬내부저항이 인덕턴스에 비해 매우 작다면, 인덕터의 시정수에 의한 시간지연을 무시할 수 있다.

그림 2는 L 필터의 인덕턴스와 LCL 필터의 전체인덕턴스가 동일한 경우의 L 필터와 LCL 필터의 보드선도를 나타낸다. 이때 계통연계형 인버터를 통해 계통에 주입되는 전류의 기본과 응답특성을 위한 기본과 주파수와 주입전류의 주요한 왜곡원인이 되는 LCL 필터의 공진주파수 및 스위칭 주파수영역에 대한 해석이 필요하다.

$$|G(j\omega_1)_L| = -20\log\omega_1 - 20\log L \tag{6}$$

$$|G(j\omega_1)_{LCL}| = -20\log\omega_1 - 20\log L \tag{7}$$

식 (6)과 식 (7)은 기본과 주파수에서 L 필터와 LCL 필터 주파수응답을 나타낸다. 여기서 L 필터의 필터 인덕턴스와 LCL

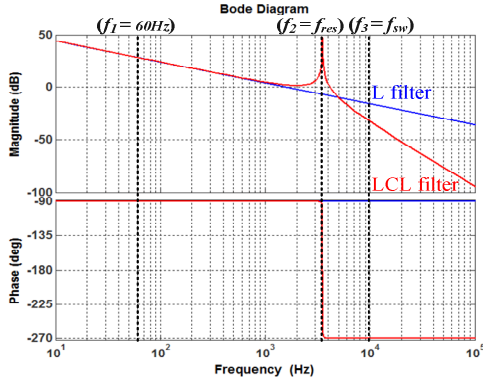


그림 2 L 필터와 LCL 필터의 보드선도

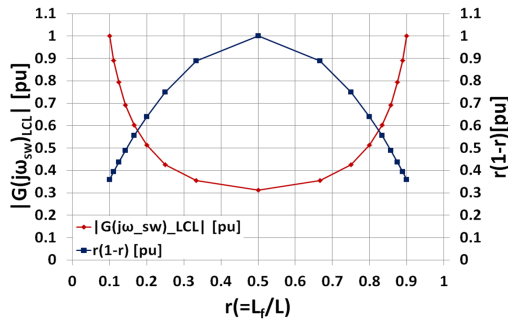


그림 3 인덕터 비율에 따른 $|G(j\omega_3)_{LCL}|$ 및 $r(1-r)$ 퍼유닛 그래프

필터의 전체인덕턴스가 동일한 경우, 기본과 주파수에서의 L 필터와 LCL 필터 응답특성은 동일함을 알 수 있다. 이는 그림 2의 L 필터와 LCL 필터의 보드선도를 통해 이를 확인 할 수 있다.

$$|G(j\omega_2)_L| = -20\log\omega_2 - 20\log L \quad (8)$$

$$|G(j\omega_3)_{LCL}| = -20\log\omega_3 - 20\log L - 20\log 2\zeta \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)는 LCL 필터의 공진주파수대에서 L 필터와 LCL 필터 주파수응답을 보이며, 이를 통해 LCL 필터의 공진 주파수대에서 L 필터와 LCL 필터의 차이는 감쇠비 ζ 에 의한 것임을 알 수 있다.

$$|G(j\omega_3)_L| = -20\log\omega_3 - 20\log L \quad (10)$$

$$r = L_f / L \quad (11)$$

$$|G(j\omega_3)_{LCL}| = -20\log\omega_3 - 20\log L - 40\log\omega_3 - 20\log r(1-r)LC_f \quad (12)$$

L 필터와 LCL 필터의 스위칭 주파수대의 응답은 계통주입전류의 스위칭 리플과 연관이 있으며, L 필터의 스위칭 주파수대의 응답은 식 (10)과 같다. LCL 필터에서 인버터 측 필터인덕턴스와 전체인덕턴스의 비율을 식 (11)와 같이 정의 한다면, LCL 필터의 스위칭 주파수에서 응답은 식 (12)과 같다. 이를 통해 스위칭 주파수영역에서 LCL 필터가 L 필터에 비해 -40dB/decade의 감쇄성분과 LCL 필터요소에 따른 증가성분이 추가됨을 알 수 있다. 그림 3은 인덕터 비율에 따른 $|G(j\omega_3)_{LCL}|$ 및 $r(1-r)$ 퍼유닛 그래프를 나타내며 LCL 필터의 최적 인덕터 비율, r 은 $|G(j\omega_3)_{LCL}|$ 가 최소가 되는 0.5임을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션

본 논문은 LCL 필터를 이용한 3상 계통연계형 인버터의 효율적인

표 1 3상 계통연계형 인버터 설계사양

정격전력 (P_{rated})	30kW
계통 선간 전압 (V_g)	220V _{ac}
DC link 전압 (V_{dc})	400V _{dc}
계통전원 주파수 (f_g)	60Hz
스위칭 주파수 (f_{sw})	10kHz
%Dead time (T_{dead} / T_{sw})	0%~3%
전체인덕턴스 (L)	100uH
인덕터 비율 (r)	0.1~0.9
필터 커패시턴스 (C_f)	82.2uF

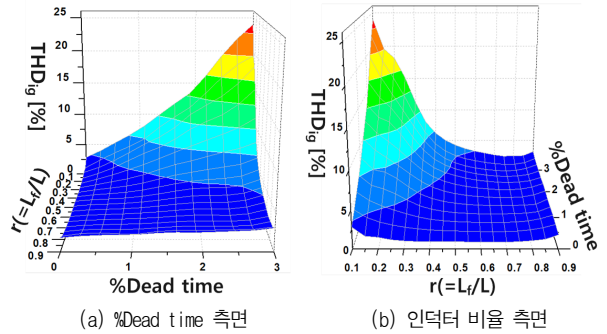


그림 4 스위치 데드타임 및 LCL 필터의 인덕터 비율변화에 따른 계통연계형 인버터의 a상 계통출력전류 THD

저차 고조파 및 스위칭 고조파의 감쇄를 위한 LCL 필터의 최적 인덕터 비율을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink를 이용한 인덕터 비율 및 스위치 데드타임의 변화에 따른 인버터 계통출력전류 THD를 확인 하였다. 표 1은 분석 대상 3상 계통연계형 인버터의 사양을 나타낸다.

그림 4는 스위치 데드타임 및 LCL 필터의 인덕터 비율변화에 따른 계통연계형 인버터의 a상 계통주입전류 THD를 나타낸다. 그림 4(b)의 시뮬레이션 결과를 보면, 계통주입전류의 THD는 데드타임의 길이와 비례적임을 알 수 있다. 데드타임이 0%인 경우 인덕터 비율이 0.5인 경우 최소의 계통주입전류 THD를 보였지만, 데드타임이 상승할수록 THD가 최소로 되는 필터인덕터의 비율이 0.75로 수렴함을 확인할 수 있다. 이는 스위치 데드타임으로 인해 저차고조파 왜곡이 추가적으로 발생하며, 스위칭에 의한 고조파와 데드타임에 의한 저차고조파를 통합적으로 감쇄하기 위해서는 인버터 측 필터 인덕터의 크기가 계통 측 필터 인덕터에 비해 커야 함을 의미한다.

4. 결론

본 논문은 LCL 필터의 최적의 인덕터 비율을 설계하고자 기본과 주파수 및 LCL 필터의 공진주파수, 스위칭 주파수영역에 대한 L 필터와 LCL 필터의 주파수응답을 해석하였다. 해석결과를 바탕으로, 스위치 데드타임 및 스위칭노이즈에 의한 계통주입전류의 왜곡을 통합적으로 감쇄하기 위한 LCL 필터의 최적 인덕터 비율은 0.75임을 제시하였다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 한국연구재단에서 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2016R1D1A3B01008279)

참고 문헌

[1] J. Mühlethaler, M. Schweizer, R. Blattmann, J. W. Kolar and A. Ecklebe, "Optimal design of LCL harmonic filters for three-phase PFC rectifiers," IEEE Trans. Power Electron, vol. 28, no. 7, pp. 3114-3125, 2013