

스위칭 리플 저감 향상을 위한 단상 인버터의 LCL 필터 설계

유진건, 조종민, 송우석, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Design of LCL Filter of Single Phase Inverter for Improving Current Ripple Reduction

Zhenqian Liu, Jongmin Jo, Wooseok Song, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 전류의 스위칭 리플 저감 향상을 위한 계통연계형 단상 인버터의 LCL 필터 설계방법을 제안하였으며 LCL 필터는 %임피던스 값을 기준으로 전류리플 저감 관점에서 설계하였다. 컨버터 측 필터 인덕터는 인버터의 모듈레이션 인덱스에 따른 정격전류에 대한 스위칭 주파수 전류성분의 리플율을 고려하였으며, 필터 커패시터는 정격 조건에서 흡수되는 무효전력의 크기를 제한하였다. 계통 측 필터 인덕터는 컨버터 측 전류와 계통 측 전류의 스위칭 주파수 성분의 감쇄비를 고려하여 설계하였다. 설계된 LCL 필터를 단상 인버터에 적용하여 전류 제어 안정성 및 전류리플특성을 시뮬레이션을 통해 필터 설계의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 전 세계적으로 지구 온난화에 따른 기온변화 현상 등에 관심이 급증함에 따라 태양광, 풍력 등 신재생에너지나 에너지저장시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 친환경 에너지원들은 계통과의 연계를 위해서는 전력변환기가 필수적으로 요구된다. 계통연계를 위해 적용된 전력변환기는 고주파 스위칭 동작을 수행하는 반도체 소자로 인해 계통에 유입되는 출력전류는 고조파 성분이 포함되어 있으며, 이러한 전류리플 성분은 제어기에 의한 역제가 불가능하며, 수동 필터에 의해 감소시킬 수 있다. 따라서 전력품질 향상을 위해 출력필터가 요구된다. 전력계통에 유입되는 전력의 안정성 및 품질향상을 위해 출력전류의 전고조파왜율은 5% 이하로 제한하고 있다. 기존 L 필터는 가격이 비싸고 체적이 크다는 단점으로 인해 최근에는 L 필터 대비 필터 설계 비용을 줄이고 스위칭 리플저감 특성 향상이 좋은 LCL 필터에 대한 연구가 활발히 진행 중인 추세이다. 이러한 장점에 반해 LCL 필터는 설계 과정이 복잡하기 때문에 필터의 성능향상을 위한 적절한 설계과정이 요구된다.

본 논문에서는 단상 풀브릿지 구조를 갖는 계통 연계형 전압형 PWM 인버터에서 필터 인덕터의 크기와 스위칭 리플율 간의 관계를 분석하고, 주어진 스위칭 리플율을 만족하는 LCL 필터 설계 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 단상 풀브릿지 인버터의 리플전류 해석

본 절에서는 단상 풀브릿지 인버터의 리플전류 특성을 해석한다. 기본적으로 계통에 유입되는 출력전류는 정격주파수에 해당하는 전류성분만을 공급하는 것이 이상적이나 전력변환기의 스위칭 특성으로 인해 스위칭 주파수에 해당하는 전류리플 성분이 필연적으로 포함된다. 기본과 주파수와 스위칭 주파수의 전류 성분은 식 (1)과 같이 리플율로 정의할 수 있다. I_r 는 스위칭 리플 성분의 실효값이고 I_{rate} 는 정격 전류의 실효값이며 전류 리플율이 작을수록 전력품질은 향상된다.

$$RF = \frac{I_r}{I_{rate}} \times 100[\%] \quad (1)$$

식 (2)는 인덕터에 흐르는 리플전류의 크기이며, 식 (3)은 리플전류의 실효값을 나타낸다^[1].

$$\Delta i_{pp} = \frac{V_{DC}T_s}{2L_1}(1 - m_a \sin(\omega t)) \times m_a \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$I_r = \frac{V_{DC}T_s}{4L_1} \sqrt{\frac{2m_a^2}{3\pi} \left[\pi \left(1 + \frac{3}{4}m_a^2 \right) - \frac{4}{3}m_a \right]} \quad (3)$$

그림 1은 식 (2)를 이용하여 모듈레이션 인덱스(m_a) 변화와 전류의 위상변화에 따른 리플전류의 크기 분포를 보여준다.

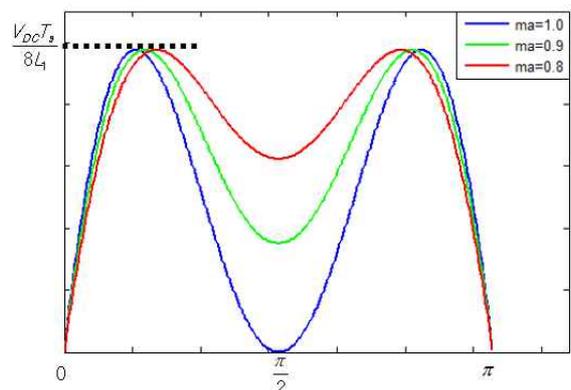


그림 1 모듈레이션 인덱스에 따른 Δi_{pp} 의 크기 분포
 Fig. 1 The magnitude distribution of Δi_{pp} according to m_a

그림 2는 m_a 가 0.9일 때, 리플전류의 시뮬레이션 결과를 보여주며, 그림 2에서 해석한 바와 같이 전류 위상에 따른 리플 전류 크기가 동일한 특성으로 변화하는 것을 알 수 있다.

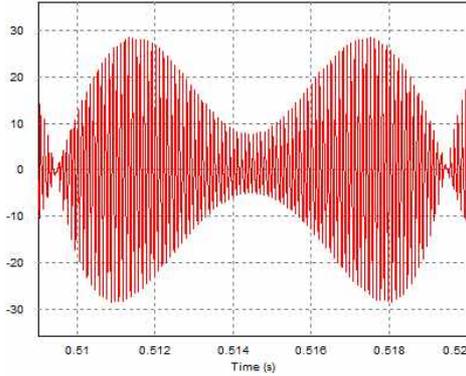


그림 2 리플전류 시뮬레이션($m_a=0.9$)
Fig. 2 Simulation of ripple current($m_a=0.9$)

3. 단상 풀브릿지 인버터의 LCL 필터 설계

그림 3은 단상 풀브릿지 인버터의 구조를 보여주는 것으로 인버터 측 인덕터 L_1 , 필터 커패시터 C_f , 계통 측 인덕터 L_2 로 구성된 LCL 필터가 적용된 구조이다.

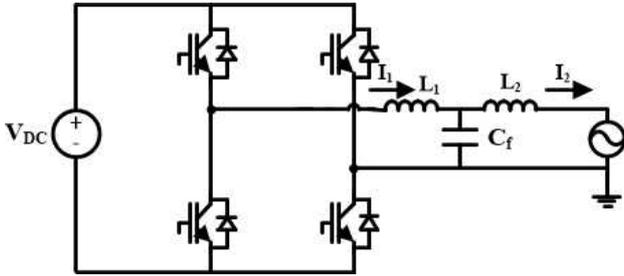


그림 3 단상 풀브릿지 인버터의 회로
Fig. 3 The circuit of single-phase full-bridge inverter

3.1 인버터 측 필터 인덕터 L_1 설계

단상 풀 브릿지 인버터의 경우, 필터 인덕터에 흐르는 기본 파 성분 전류의 실효값은 식 (4)와 같다.

$$I_{rate} = \frac{m_a V_{DC}}{\sqrt{2} Z_b} = \frac{m_a T V_{DC}}{2\sqrt{2}\pi L_b} \quad (4)$$

위 식들을 이용하여 인버터 측 필터 인덕터 L_1 값은 식 (5)와 같이 유도할 수 있으며, L_1 은 전류 리플율과 상관관계가 있음을 알 수 있다.

$$L_1 = \sqrt{\frac{\pi}{3} \left[\frac{\pi}{4} (1 + \frac{3}{4} m_a^2) - \frac{4}{3} m_a \right]} \cdot \frac{T_s}{T} \cdot \frac{L_b}{RF} \quad (5)$$

3.2 필터 커패시터 C_f 설계

필터 커패시턴스(C_f)는 시스템의 베이스 커패시턴스(C_b)에 무효 전력 흡수율 x 와의 곱으로 정의한다. 정격 조건에서의 베

이스 커패시턴스는 식 (6)과 같고, 무효전력 흡수율을 고려한 필터 커패시터 설계 값은 식 (7)과 같다^[2].

$$C_b = \frac{1}{2\pi f Z_b} \quad (6)$$

$$C_f = x C_b \quad (7)$$

3.3 계통 측 인덕터 L_2 설계

계통 측 인덕턴스 L_2 는 인버터 측 인덕턴스 L_1 에 전류리플 감쇄율 r 의 곱으로 정의되며 다음 식과 같이 표현된다.

$$L_2 = r L_1 \quad (8)$$

전류리플 감쇄율 r 은 L_1 으로만 구성된 필터가 접속되었을 때의 전류 리플값과 LC 부분이 추가되었을 때 계통 측 필터 인덕터 L_2 의 전류 리플값의 비에 의한 식으로 정의 된다. LC 부분의 추가로 인한 전류 리플의 저감은 그림 4를 통한 단상 등가회로에서의 전달함수를 통하여 나타낼 수 있다.

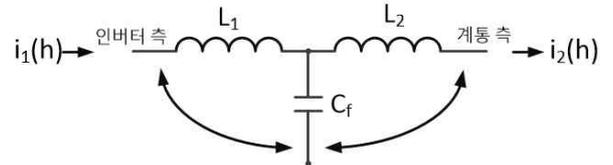


그림 4 h차 고조파에서의 LCL필터 단상 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of single phase LCL filter at h-order harmonic

그림 4의 회로에서 컨버터 측의 전류와 계통 측의 전류간에 전달함수식을 나타내면 다음 식과 같다^[2].

$$\frac{i_2(h_{sw})}{v(h_{sw})} = \frac{z_{LC}^2}{\omega_{sw} L_1 \cdot |\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|} \quad (9)$$

$$\frac{i_1(h_{sw})}{v(h_{sw})} = \frac{1}{\omega_{sw} L_1} \quad (10)$$

$$\frac{i_2(h_{sw})}{i_1(h_{sw})} = \frac{z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|} \quad (11)$$

식 (11)은 전류리플 감쇄율 r 과 무효전력 흡수율 x 와의 관계를 이용하여 식 (12)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{i_2(h_{sw})}{i_1(h_{sw})} = \frac{1}{|1 + r(1 - ax)|} \quad (12)$$

$$a = L_1 C_f \omega_{sw}^2 \quad (13)$$

4. LCL필터 설계 및 시뮬레이션

5kW, 220V 시스템에 적용된 LCL 필터 설계를 다음과 같다. 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

RF는 10%로 가정하고 식(5)를 통해 L_1 는 510 μ H인 것을 얻을 수 있다. 필터 커패시터는 무효 전력 흡수율을 2.5% 정도로

고려하고 식(7)을 통해 $6.85\mu\text{F}$ 로 설계하였다. r 는 0.34로 선정하고 식(8)을 통해 L_2 는 $172.7\mu\text{H}$ 로 설계하였다. LCL 필터 설계 결과는 표 2와 같다. 그림 5은 $i_g(h_{sw})/i(h_{sw})$ 와 r 의 관계를 보여준다. 그림을 통해 $i_g(h_{sw})/i(h_{sw})$ 는 r 의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 리플 전류 감쇄는 0.3로 설정하면 r 는 0.34인 것을 얻을 수 있다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Parameter	Symbol	Value	Unit
Rated output power	P	5000	W
Grid voltage	V	220	V _{rms}
DC link voltage	V _{DC}	400	V
Grid frequency	f	60	Hz
Switching frequency	f _s	10000	Hz
Ripple factor	RF	0.1	
Current ripple attenuation	A	0.3	
Reactive power absorption rate	x	0.025	

표 2 LCL 필터 설계 결과
Table 2 LCL filter design result

Parameter	Symbol	Value	Unit
Inverter side inductance	L ₁	510	μH
Capacitance	C _f	6.8	μF
Grid side inductance	L ₂	170	μH

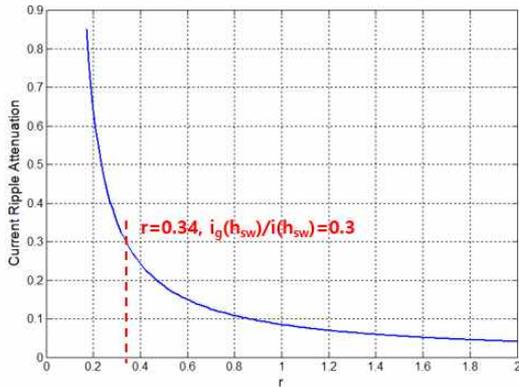


그림 5 리플 전류 감쇄와 r의 관계
Fig. 5 Relation between current ripple attenuation and r

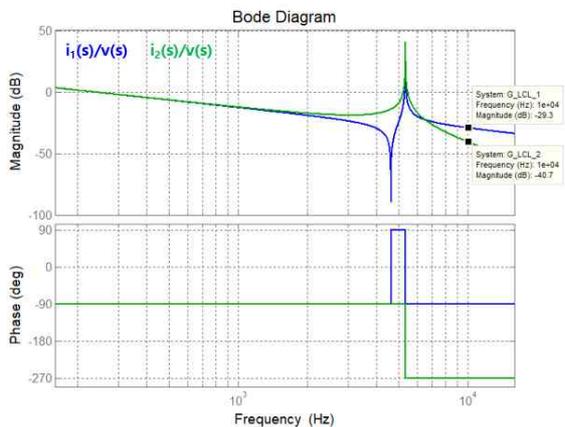


그림 6 리플 전류 감쇄와 r의 관계
Fig. 6 Relation between current ripple attenuation and r

그림 6은 LCL 필터의 보드도이다. 그림을 통해 $f_s = 10\text{kHz}$ 때, 리플 전류 감쇄는 0.315정도 나온 것을 알 수 있다. 그림 7은 시뮬레이션 회로이고 그림 8은 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통해 설계된 LCL 필터가 단상 인버터에 잘 적용하고 전류 제어가 잘 되는 것을 확인하였다.

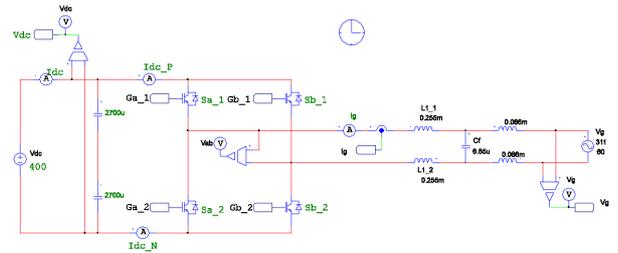


그림 7 시뮬레이션 회로
Fig. 7 Circuit of simulation

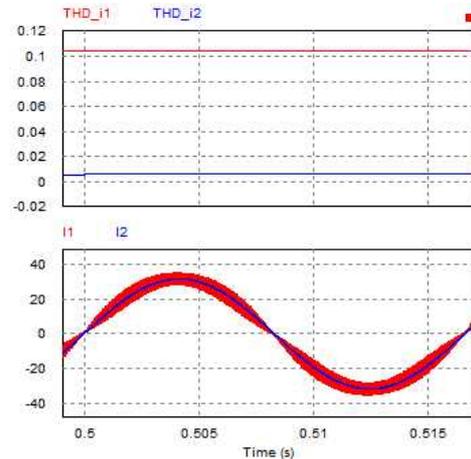


그림 8 $m_a=0.78$ 일 때 단상 풀브릿지 인버터의 시뮬레이션
Fig. 8 Simulation waveforms of single-phase full-bridge inverters when $m_a=0.78$

5. 결론

본 논문은 계통연계형 단상 인버터의 LCL 필터 설계방법을 제시하였다. 인버터 측 필터 인덕터는 인버터의 모듈레이션 인덱스에 따른 정격전류에 대한 스위칭 주파수 전류성분의 리플을 고려하였으며, 필터 커패시터는 정격 조건에서 흡수되는 무효전력의 크기를 제한하였다. 계통 측 필터 인덕터는 컨버터 측 전류와 계통 측 전류의 스위칭 주파수 성분의 감쇄비를 고려하여 설계하였다. 설계된 LCL 필터를 단상 인버터에 적용하여 전류 제어 안정성 및 전류리플 특성을 시뮬레이션을 통해 필터 설계의 타당성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 김효성, "단상풀브릿지 구조를 갖는 계통연계형 인버터의 필터인덕터 설계" 전력전자학회논문지, 12(4), 346-353.
- [2] M Liserre, F Blaabjerg, S Hansen, "In Design and Control of a LCL-filter-based Three-phase Active rectifier" IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, no. 9, pp.1281-1290, 2005.