

LCL 필터 기반의 3상 계통 연계형 인버터를 위한 비반복적 최적 필터 파라미터 설계 방법

김현식*, 설승기*, 임창진**
* 서울대학교, ** LG전자

Non-iterative Optimal Filter Parameter Design Method for LCL Filter-Based Three-Phase Grid-Tied Inverter

Hyeon-Sik Kim*, Seung-Ki Sul*, Changjin Lim**
* Seoul National University, ** LG Electronics Co.

ABSTRACT

기존 LCL 필터 설계 방법의 경우, 시뮬레이션에 기반한 반복 과정을 통해 필터 파라미터를 최적화하므로 많은 시간이 소요된다. 하지만 본 논문에서는 3상 PWM 인버터와 LCL 필터 분석을 통해 설계 시 고려 사항을 단순화할 수 있다. 또한 LCL 필터의 다양한 제약 조건을 파악하고, 이러한 조건 하에서 제작 비용을 최소화할 수 있는 해석 해(analytical solution)를 도출한다. 결과적으로 제안된 단계적(step-by-step) 설계 방법을 통해 빠른 시간 내에 최적화된 LCL 필터를 선정할 수 있다. 제안된 방법의 유효성은 시뮬레이션을 통해 최종 검증하였다.

1. 서론

PWM 인버터의 경우, 계통 연계 시 PWM으로 인한 고조파 영향 저감을 위해 저역 통과 필터를 배치하는 것이 일반적이다. LCL 필터는 필터 공진 주파수 이상의 주파수 대역에서 -60dB/dec 로 출력 고조파 전류를 감쇄할 수 있어 기존 L 필터에 비해 필터 인덕턴스를 크게 저감할 수 있다.

이에 따라 LCL 필터 파라미터 설계를 위해 다양한 방안이 제시되었다. 하지만 기존 방법의 경우, 개별 고조파 성분에 대한 추정이 힘들어 과도한 마진을 두거나[1], 시행 착오법(trial and error method)에 기반하여 반복(iteration)으로 인해 많은 시간이 소요된다[2]. 또한 시뮬레이션을 통해 이를 개선하기 위해서는 더욱 큰 노력이 필요하다.

본 논문에서는 PWM 인버터의 계통 전류 분석에 기반하여 최적 LCL 필터를 설계하고자 한다. 이 경우, 단계적 설계 방법을 통해 반복 계산 없이 최적화된 필터 파라미터를 빠른 시간 내에 구할 수 있게 된다.

2. 시스템 구성

그림 1은 일반적인 2레벨 3상 계통 연계형 인버터의 구조를 나타낸다. 2레벨 인버터의 경우, 선형 MI (Modulation Index) 범위 증대 및 전류 고조파 리플 저감을 위해 주로 SVPWM을 사용한다.

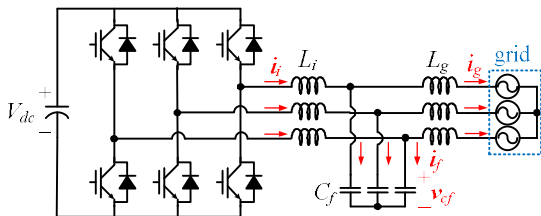
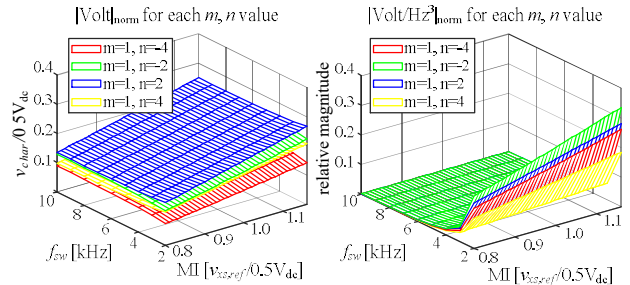


그림 1. LCL 필터 기반의 3상 계통 연계형 인버터 구성



(a) 인버터 측 전압 (b) 계통 측 전류
그림 2. SVPWM 동작 시, 전압 및 전류 고조파 크기

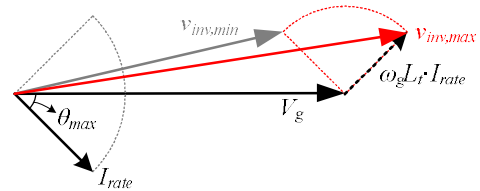


그림 3. 전류 지령과 인버터 전압 지령의 연관 관계

이 때, 인버터 측 출력 전압 고조파 성분은 MI와 f_{sw} 의 함수로 표현 할 수 있다[3]. 또한 인버터 측 출력 전압에 의한 계통 전류의 영향은 식 (1)과 같이 필터 어드미턴스 Y_{gi} 로 나타낼 수 있다. 이는 전체 인덕턴스 L_t 와 공진 주파수 ω_{res} 의 함수로 표현할 수 있다.

$$Y_{gi}(s) = \frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{L_t L_g C_f s^3 + (L_t + L_g)s} = \frac{1}{L_t s \left(\frac{s^2}{\omega_{res}^2} + 1 \right)} \quad (1)$$

$$, \text{ where } L_t = L_l + L_g, \quad \omega_{res} = \sqrt{\frac{L_t}{L_l L_g C_f}}.$$

3. 설계 시 고려 사항

3.1 최상위 주파수(most significant frequency, ω_{sig}) 파악

공진 주파수는 스위칭 주파수에 비해 충분히 낮게 설정되므로 PWM 고조파 대역에서 감쇄는 -60dB/dec로 이루어진다. 이에 따라 인버터 측 전압 고조파 성분에 필터 감쇄 성분을 곱할 경우 상대적인 계통 측 전류 고조파 성분을 구할 수 있다. 이 때 그림 2.(b)를 통해 계통 측 전류 고조파 중 $f_{sw}-2f_{grid}$ ($m=1, n=2$) 성분이 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 최상위 주파수가 계통 규정을 만족하도록 필터를 설계해야 한다.

3.2 최악 동작점(worst operating point, MI_{worst}) 파악

그림 2를 통해 MI가 높아질수록 인버터 측 전압 고조파 성분이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에

따라 높은 MI에서 동작할 때가 최상위 주파수의 전류 고조파가 가장 크게 나타나는 최악 동작점임을 확인할 수 있다.

정상 동작 범위 내에서 DC단 전압이 낮아지고 전압 지령 크기가 커질 경우 MI가 증대되게 된다. 특히 그림 3과 같이 정격 지상(lagging) 전류가 계통에 주입될 경우, 인버터 전압 지령이 가장 크게 나타난다. 결과적으로 DC 단 전압 범위 및 전류 운전 범위에 따라 최악 동작점에서 MI는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$MI_{\text{worst}} = \frac{\sqrt{(V_g + \omega_g L_f I_{\text{rate}} \sin \theta_{\text{max}})^2 + (\omega_g L_f I_{\text{rate}} \cos \theta_{\text{max}})^2}}{0.5V_{dc,\text{min}}} \quad (2)$$

, where $\theta_{\text{max}} = \cos^{-1}(pf_{\text{min}})$.

4. 설계 가이드라인

4.1 목적 함수 설계

필터 제작 비용은 주로 용량에 비례하므로 LCL 필터의 에너지 용량, 식 (3)을 최소화하도록 설계하는 것이 좋다. 단, 인덕터와 캐패시터 사이의 가중치를 두기 위해 변수 k_r 를 도입한다.

$$P_t = (0.5L_f i_i^2 + 0.5L_g i_g^2) + k_r (0.5C_f v_c^2) \approx 0.5L_f i_{\text{rate}}^2 + 0.5k_r C_f V_g^2 \quad (3)$$

이 때, 목적 함수 P_t 는 전체 인덕턴스 L_t 와 공진 주파수 ω_{res} , 인덕턴스 비 r 의 함수로 다시 정리할 수 있다.

$$L_i = \frac{1}{1+r} L_t, L_g = \frac{r}{1+r} L_t, C_f = \frac{(1+r)^2}{r} \frac{1}{L_t \omega_{\text{res}}^2} \quad (4)$$

$$P_t = 0.5(L_f i_{\text{rate}}^2 + k_r V_g^2 \frac{(1+r)^2}{r L_t \omega_{\text{res}}^2}) \quad (5)$$

인버터 측과 계통 측 인덕턴스가 같을 때($r=1$), P_t 가 최소화되는 것을 식 (6)과 같이 편미분으로 확인할 수 있다.

$$\frac{\delta P_t}{\delta r} = 0, \text{ when } r=1. \quad (6)$$

최종적으로 L_t 와 ω_{res} 는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\min P_t = 0.5(L_f i_{\text{rate}}^2 + 4k_r V_g^2 \frac{1}{L_t \omega_{\text{res}}^2}) \quad (7)$$

$$\text{subject to } i_{g,\text{har}}(\omega_{\text{sig}}) = |Y_{gt}(j\omega_{\text{sig}})| v_{c,\text{har}}(\omega_{\text{sig}}) = \frac{v_{c,\text{har}}(\omega_{\text{sig}})}{L_t \omega_{\text{sig}} (1 - \frac{\omega_{\text{sig}}^2}{\omega_{\text{res}}^2})} \leq I_{\text{lim}} \quad (8)$$

4.2 제안한 설계 과정

표 1과 같은 운전 조건 하에서 계통 규정 IEEE 1547.2-2008을 만족하도록 LCL 필터를 설계하도록 한다. ($k_r = 1$)

- Step 1. 동작 조건 파악

최악 동작점 MI_{worst} 에서 $v_{c,\text{har}}(\omega_{\text{sig}})$ 성분만 고려한다.

- Step 2. 최적 (L_t, ω_{res}) 곡선 추출

$i_{g,\text{har}}(\omega_{\text{sig}})$ 가 전류 고조파 규정 I_{lim} 을 만족하도록 하는 최적 (L_t, ω_{res}) 조합을 구한다. 식 (9)를 통해 그림 4와 같은 (L_t, ω_{res}) 최적 곡선을 구할 수 있다.

$$\omega_{\text{res}} = \frac{\omega_{\text{sig}}}{\sqrt{1 - \frac{v_{c,\text{har}}(\omega_{\text{sig}}, L_t)}{\omega_{\text{sig}} L_t I_{\text{lim}}}}}, \text{ where } \omega_{\text{sig}} = 2\pi(f_{\text{sw}} - 2f_{\text{grid}}). \quad (9)$$

- Step 3. $P_t = f(L_t, \omega_{\text{res}})$ 곡선 추출

식 (7)에 (L_t, ω_{res})를 대입하여 그림 5와 같이 L_t 변동에 따른 목적 함수 값 P_t 를 구할 수 있다.

- Step 4. 최적 (L_i, L_g, C_f) 선정

P_t 를 최소화하는 지점에서 (L_i, L_g, C_f)를 구한다.

| Param. | Value |
|-------------------|------------------|
| V_{dc} | 600 V |
| f_{sw} | 4.98 kHz |
| pf | $\pm 0.9 \sim 1$ |
| V_{grid} | 380 V/60 Hz |

표 1. 시스템 운전 조건

| Param. | Value |
|------------------|----------|
| L_i | 0.05 pu |
| L_g | 0.05 pu |
| C_f | 0.057 pu |
| f_{res} | 1.59 kHz |

표 2. 선정된 최적 파라미터

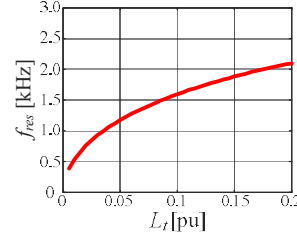


그림 4. 최적 (L_t, f_{res}) 곡선

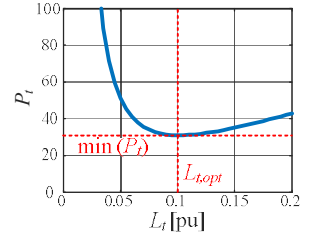
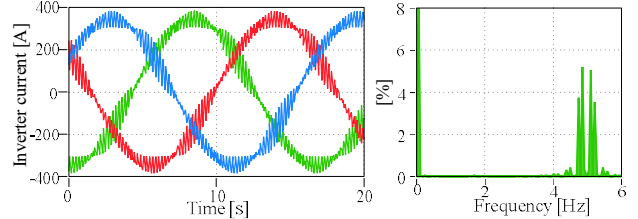
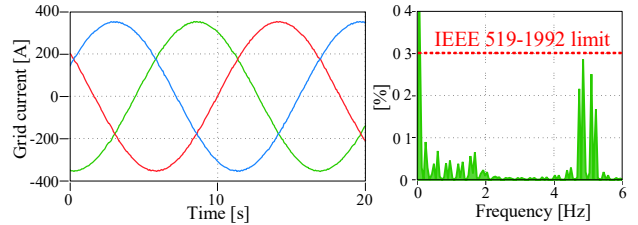


그림 5. $P_t = f(L_t, \omega_{\text{res}})$ 곡선



(a) 인버터 측 전류 파형 및 a상 전류 FFT



(b) 계통 측 전류 파형 및 a상 전류 FFT

그림 6. 최악 동작점에서의 시뮬레이션 파형

5. 시뮬레이션 검증

MATLAB/PLECS를 통해 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다. 이 때 운전 조건 및 LCL 필터 파라미터는 표 1, 표 2와 같다.

그림 6은 정격 지상 전류 주입 시, 인버터 측 및 계통 측 전류 파형 및 FFT를 나타낸다. 그림 6.(b)를 통해 설계한 LCL 필터가 최악의 동작점에서도 계통 규정 IEEE 1547.2-2008(35차 이상 홀수 전류 고조파 정격 0.3% 이내)을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 LCL 필터에 기반한 3상 계통 연계형 인버터에 대해 비반복적인 최적 필터 설계 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통해 시뮬레이션 혹은 반복 계산 과정 없이도 빠른 시간 내에 최적 필터 파라미터를 선정할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 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. 2005.
- [2] K. Jalili and S. Bernet, "Design of LCL Filters of Active-Front-End Two-Level Voltage-Source Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1674–1689, May 2009.
- [3] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practice*. New York, NY, USA: Wiley, 2003.