

계통연계형 인버터의 LCL필터 설계

한철*, 박병우*, 양승학**, 남해곤*, 박성준*
 전남대학교*, 호남대학교**

LCL Filter Design for grid-connected inverter

Chul Han*, Byoung Woo Park*, Hae Gon Nam*, Seung Hak Yang**, Sung Jun Park*
 Chonnam National University*, Honam University**

ABSTRACT

계통연계형 인버터는 스위칭 주파수로 인한 출력단에 고조파를 함유하고 있기 때문에, 고조파 감소를 위한 수동필터가 필수적으로 필요하다. 이러한 수동 필터는 다양한 용량 및 부하, 넓은 범위의 입·출력 조건 등 여러 가지 파라미터를 필요로 하기 때문에 LCL필터는 설계가 어렵다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 임피던스 크기, 스위칭 고조파 제한, 기본파 성분 에 대한 고조파 제한의 3가지 구속조건에 따른 LCL필터를 설계방법을 제안하며, 이를 실제 시뮬레이션을 통해 계통 연계형 LCL필터로서의 타당성을 검증할 것이다.

1. 서 론

태양광, 연료전지, 풍력 등을 사용하는 신재생 에너지 발전 시스템에는 직류 링크단을 입력으로 하여 제어할 수 있고 계통연계를 위한 교류 출력단 전류도 함께 제어할 수 있는 계통 연계형 3상 PWM 전압형 인버터가 널리 사용된다. 일반적으로 이와 같은 인버터의 출력 전류에는 기본파 성분 이외에 스위칭 주파수의 정수배에 해당하는 고조파 성분이 포함되어 있다.^[1] 고조파 특성을 향상시키기 위해서는 큰 인덕턴스를 가진 필터를 필요로 하지만 큰 인덕턴스를 가진 필터는 비용을 야기 시키고 시스템의 동특성을 나쁘게 하는 단점이 있다. 그러므로 전류리플 감쇄 효과를 크게 하여 고조파 특성을 향상시키면서도 작은 인덕턴스 값을 가지는 필터를 설계할 필요가 있다.^[2]

2. LCL 필터 설계

2.1 LCL 필터 구조

PWM 인버터는 스위칭에 의해 출력전압을 형성함으로써 계통과 연계하기 위해서는 템프가 필수적이며, 이 템프용으로 LC 및 LCL필터가 일반적으로 사용되나, 계통으로 흘러 들어가는 스위칭 고조파 전류를 효과적으로 억제하기 위해서는 그림 1과 같은 LCL필터 사용이 일반적이다. 전압형을 이용한 계통전류 제어를 구성할 시 전압, 전류센서의 검출위치에 따라 다양한 방식이 있으나, 본 제어방식은 계통측에서 전압, 전류를 검출함으로써 계통역률을 단위역률로 제어하는 방식을 택하였다.

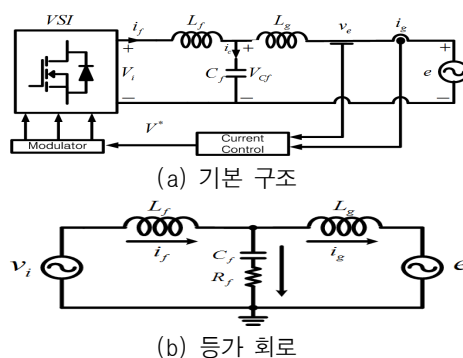


그림 1. 인버터 및 LCL 필터 기본 구조 및 등가 회로
 Fig. 1 Inverter and LCL filter, the basic structure and equivalent circuit

그림 1(b)로부터 인버터전압에 대한 전류의 전달함수는 식(1)과 같이 주어진다. 전달함수에서 알 수 있듯이 직렬저항이 증가하면 안정도와 손실은 증가하나 LCL필터의 효과는 저감됨을 알 수 있다. 따라서 인버터 전류의 안정화를 위해 어느 정도의 직렬저항은 필수적이다.

$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{1}{L_f s} \frac{(s^2 + \frac{R_d}{L_g} s + z_{LC}^2)}{(s^2 + \frac{L_T R_d}{L_f L_g} s + w_{res}^2)} \quad (1)$$

$$z_{LC} = \frac{1}{\sqrt{L_g C_f}}, \quad w_{res} = \sqrt{\frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f}}$$

식(1)에 의해 인버터 전류가 안정화된다고 가정하면, LCL필터는 인버터의 전압에 의한 계통 측 전류에 대한 관점에서 설계가 이루어져야하며, 이에 대한 전달함수는 식(2)와 같다. 식(2)를 주파수 영역에서 해석하기 위한 전달함수는 식(3)과 같다.

$$\frac{i_g(s)}{v(s)} = \frac{1}{L_f s + s L_g + s^2 L_f L_g C_f} = \frac{1}{L_f s} \frac{L_f}{s^2 + L_f L_g C_f + L_f + L_g} \quad (2)$$

$$H(j\omega) = A \angle \theta$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{[\omega(L_f + L_g)]^2 + [(\omega^2 L_f L_g C_f)]^2}} \quad (3)$$

2.2 LCL 필터설계시 구속조건

식(3)에서 인버터의 전압에 대한 계통 측 전류는 그 크기와 위상으로 표현되나, 계통 측으로 유입되는 고조파 전류를 억제시키기 위한 목적이므로 위상에 의한 영향은 고려하지 않고 그 크기에 대한 영향만 고려한다. 연계형인버터는 탭프인 LCL필터에 인가되는 전압을 제어하여 계통 전류를 제어하게 되며, 그 임피던스의 크기는 적을수록 시스템 성능 및 효율향상에 기여하나 인버터의 출력전압 발생분해능에 따라 그 크기가 제한된다. 따라서 제한 조건 식(4)는 계통전류 제어의 안정성을 고려하여 LCL필터의 임피던스 크기에 의해 제한되며 그 값은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{|Z|I_R}{e} < \alpha \quad (4)$$

$$|H(j\omega_{sw})| < \beta \quad (5)$$

$$|H(j5\omega_e)| < \gamma \quad (6)$$

또한 LCL필터는 인버터의 스위칭 고주파전압에 대한 계통 유입을 제거하여야 한다. 따라서 인버터에서 발생하는 스위칭 고조파 성분에 대한 전류감쇄가 제한되어야 하며 그 값은 식(5)와 같이 정의 한다. 그리고 인버터 저차고조파 성분에 대한 감쇄가 이루어져야 연계규정을 만족할 수 있으며, 3고조파성분은 변압기 결선에 의해 제거할 수 있으므로, 그 중 최저주파수성분이 5고조파를 고려하여 그 제한이 결정되며 그 값은 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

2.3 시뮬레이션 결과

필터 설계시 구속조건인 $\alpha = 0.27, \beta = 0.001, \gamma = 0.3$ 로 설정하여 설계한 결과 $L_f = 1.5mH, L_g = 0.5mH, C_f = 40\mu F$ 로 선정되었으며 구속조건은 $\alpha = 0.26, \beta = 0.0005, \gamma = 0.28$ 로 설계사양의 조건 내에 존재하였으며 그림 2는 그 결과 파형이다.

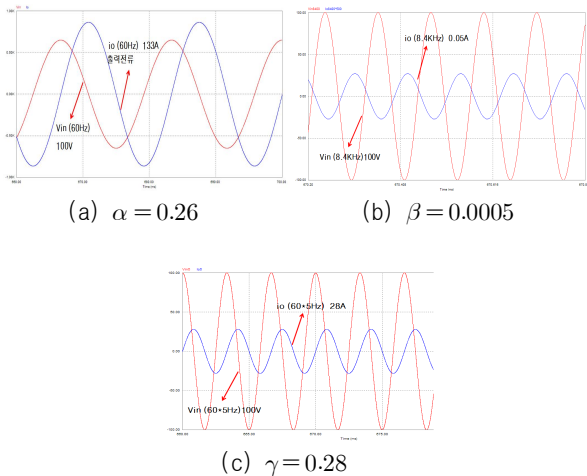
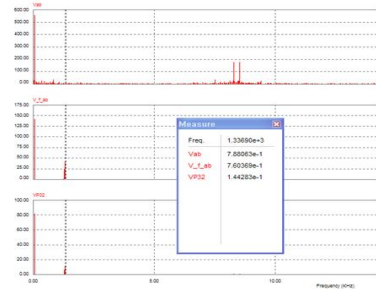
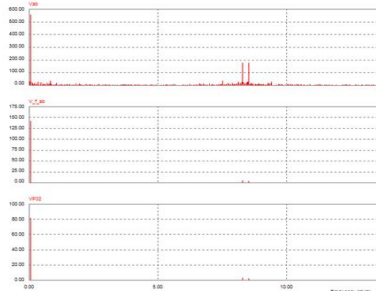


그림 2. α, β, γ 시뮬레이션 파형
Fig. 2 Simulation waveforms of α, β, γ

그림 3은 설계된 L_f, L_g, C_f 에 대한 3상 PWM 인버터에 대한 FFT 시뮬레이션 결과로 그림 3(a)는 커패시터 직렬 댐핑저항 R_d 를 고려하지 않은 결과 파형으로 공진주파수 영역에서 출력신호가 제거 되지 않는 것을 볼 수 있으며, 그림 3(b)는 공진주파수 및 C_f 를 고려하여 설계된 $R_d = 2\Omega$ 을 적용시킨 FFT 분석 결과이며 그림 3(a)에 있던 공진주파수 영역의 신호가 모두 제거 된 것을 볼 수 있다.



(a) $R_d = 0$ 일 때의 FFT 파형



(b) $R_d = 2$ 일 때의 FFT 파형

그림 3. FFT 결과 파형
Fig. 3 Result waveforms of FFT

3. 결론

계통 연계형 수동 필터는 다양한 용량 및 부하, 넓은 범위의 입·출력 조건 등 여러 가지 파라미터를 필요로 하기 때문에 설계가 어렵다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 임피던스 크기, 스위칭 고조파 제한, 기본파 성분에 대한 고조파 제한의 3가지 구속조건에 따른 LCL필터의 설계방법을 제안하였으며, 이를 실제 시뮬레이션을 통해 계통 연계형 LCL필터로서의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Erika Twining and Donald Grahame Holmes, "Gridcurrent regulation of a three phase voltage sourceinverter with an LCL input filter", *IEEE Trans.Power Electron.*, Vol. 18, No. 3, 2003, May.
- [2] M. Liserre, A. Dell'Aquila, F. Blaabjerg, "Genetic algorithm based design of the active damping for an LCL_filter three phase active rectifier", *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 19, pp. 76 86, Jan 2003