

LCL 필터를 갖는 계통 연계형 인버터의 제어기 분석

허진용, 조광래, 김학수 노의철
부경대학교

Analysis of Grid-Connected Inverter Controller with LCL Filter

Jin-Yong Heo, Kwang-Rae Jo, Haksoo Kim and Eui-Cheol Nho
Pukyong National Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터에서 시스템을 안정시키기 위해 피드백 경로에 2차 저역 통과 필터(LPF)를 사용하였을 때 LPF의 감쇠비에 따른 응답특성을 분석한다. 계통연계형 인버터에서 LCL 필터를 사용할 때 필터의 공진 현상으로 인해 시스템은 불안정해지기 때문에 시스템을 안정화시킬 수 있는 기법이 필요하다. 피드백 경로에 LPF를 사용하면 시스템은 안정해 질 수 있지만, 2차 LPF의 감쇠비와 자연주파수에 따라 응답 특성이 바뀌게 된다. 따라서 감쇠비에 따른 시스템 안정도를 시뮬레이션을 통해 확인한다.

1. 서론

계통연계형 인버터는 태양광 발전이나 DC전원으로 부터 계통에 전력을 공급하는 동작을 수행한다. 하지만 전력 변환 과정에서 스위칭 동작이 고조파를 발생시키기 때문에 필터가 필수적으로 사용된다. LCL 필터를 사용하는 경우 L 필터를 사용하는 경우 보다 전체 필터 크기를 줄일 수 있어 경제적이지만 필터의 공진 현상으로 인해 시스템이 불안정하다. 그렇기 때문에 시스템을 안정화시킬 수 있는 여러 기법들이 연구되어왔다.^[1-3] 그 중 피드백 경로에 2차 LPF를 사용하였을 때 시스템이 안정화시키는 기법이 소개되었다.^[1] 하지만 LPF의 감쇠비에 따라 시스템의 응답특성은 바뀌게 되기 때문에 계통연계형 인버터의 안정을 위해 적절한 값이 선택되어야한다. 본 논문에서는 피드백 경로에 LPF를 사용할 경우 감쇠비가 계통연계형 인버터의 안정도에 미치는 영향을 분석한다.

2. 감쇠비에 따른 Z평면에서 극점의 이동

그림 1은 LCL 필터를 갖는 계통 연계형 인버터를 나타낸다. 피드백 경로에 LPF가 사용된 시스템 블록 다이어그램이 그림 2에 나타나 있다. $C(z)$, $G_i(s)$ 는 각각 전류 제어를 위한 Z 변환 된 PR(Proportional-Resonant) 제어기와 플랜트를 나타내고 피드백 경로의 $LPF(s)$ 는 2차 저역 통과 필터를 나타내며 식 (1)과 같다.

$$LPF(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

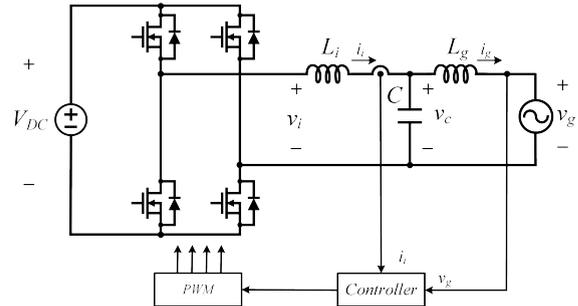


그림 1 LCL 필터를 갖는 계통 연계형 인버터
Fig. 1 Grid-connected inverter with LCL filter

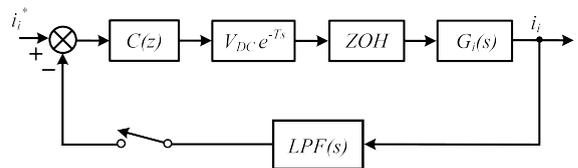


그림 2 시스템 블록 다이어그램
Fig. 2 Block diagram of the system

ω_n, ζ 는 각각 2차 저역통과 필터와 고유주파수를 나타내고 시스템의 안정도에 영향을 미치는, 요소이다.

인버터 출력 전압과 전류의 전달함수 $G_i(s)$ 는 식 (2)와 같고 LCL 필터의 공진주파수 ω_{res} 는 식 (3)과 같다.

$$G_i(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{L_g C}}{L_i s(s^2 + \omega_{res}^2)} \quad (2)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C}} \quad (3)$$

그림 3은 LPF의 감쇠비의 증가에 따른 시스템 극점 변화를 나타낸다. LPF의 고유주파수가 3000 [Hz]일 경우 감쇠비가 증가함에 따라 극점은 붉은 선을 따라 이동하게 된다. 그림 4는 그림 3의 붉은 상자 안의 A 영역에 있는 극점의 이동을 확대한 것이다. 감쇠비가 작을 경우 극점은 단위원 안에 위치하지만 감쇠비가 10이 넘어가게 되면 극점이 단위원 밖으로 나가게 되면서 시스템은 불안정해진다.

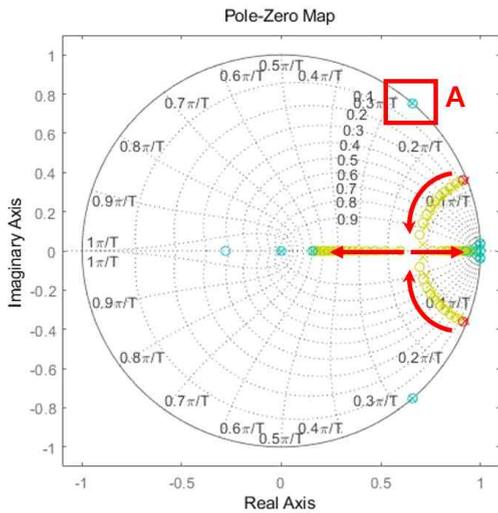


그림 3 2차 저역 통과 필터의 감쇠비 변화에 따른 시스템 극점 변화
 Fig. 3 System poles according to the changing of the damping ratio

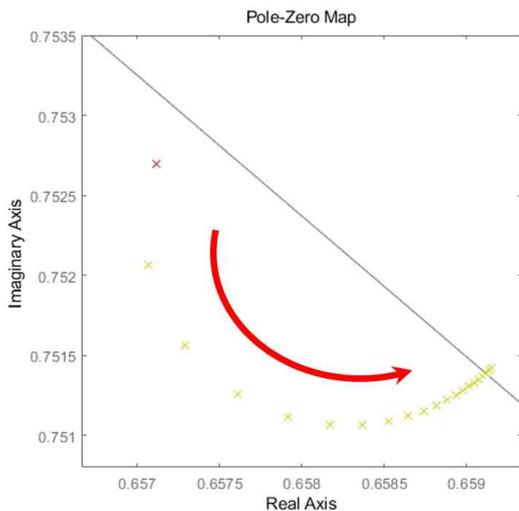


그림 4 2차 저역 통과 필터의 감쇠비 변화에 따른 A-영역의 극점 변화
 Fig. System poles in area A according to the changing of the damping ratio

3. 시뮬레이션

감쇠비에 따른 시스템의 안정도를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1에 나타나 있다. LPF의 감쇠비를 0.3, 10으로 두었을 때 계통 전압과 전류를 그림 5, 6에 각각 나타내었다. 감쇠비가 0.3인 경우 즉 A 영역의 극점이 단위원 안에 위치할 경우 시스템 응답이 지령을 추종하는 것을 확인 하였고 A-영역의 극점이 단위원을 벗어나는 감쇠비가 10인 경우 전류가 지령을 추종하지 못하고 발산하는 것을 확인 하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
 Table 1 Simulation parameters

Parameter	value	Parameter	value
L_i	$700[\mu H]$	v_g	$220[V]$
L_g	$250[\mu H]$	V_{DC}	$380[V]$
C	$3[\mu F]$	f_s	$50[kHz]$

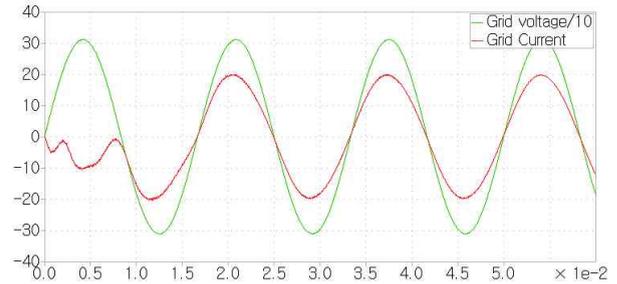


그림 5 감쇠비가 0.3인 경우 계통 전압과 전류
 Fig. 5 Grid voltage and current when damping ratio is 0.3

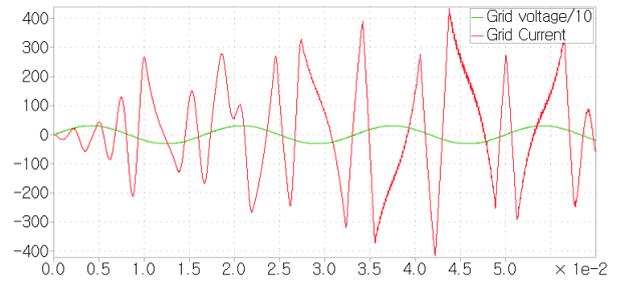


그림 6 2감쇠비가 10인 경우
 Fig. 6 Grid voltage and current when damping ratio is 10

4. 결론

본 논문에서는 LCL 필터를 갖는 계통연계형 인버터를 안정시키기 위해서 피드백 경로에 2차 LPF를 사용할 경우 감쇠비에 따른 시스템 안정도를 판별하였다. Z 평면에서 감쇠비 변화에 따른 극점의 이동을 확인하였고 시스템이 안정한 감쇠비의 임계값을 찾았다. 시스템을 안정시키고 응답특성을 개선시키기 위해서는 적절한 감쇠비의 선택이 필요하다.

참고 문헌

- [1] 박권식, 서병준, 김학수, 노의철. (2018). LCL 필터를 사용하는 계통 연계형 인버터의 넓은 안정 영역을 갖는 새로운 제어 및 설계 기법. 전력전자학회논문지, 23(6), 440-445.
- [2] W. Yao, Y. Yang, X. Zhang, F. Blaabjerg and P. C. Loh, "Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Using Digital Notch Filters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 3, pp. 2360-2375, March 2017.
- [2] J. C. Wiseman and Bin Wu, "Active damping control of a high-power PWM current-source rectifier for line-current THD reduction," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 758-764, June 2005.