

능동댐핑을 통한 LCL필터 기반 3상 인버터의 안정도 향상

이태진, 조종민, 차한주
충남대학교 전기공학과

Stability Improvement of Three Phase Inverter based on LCL filter using an Active Damping

Taejin Lee, Jongmin Jo, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터에 커패시터 전류 피드백 방식의 능동댐핑을 적용한 안정도 향상 방안을 분석하였다. 커패시터 전류 피드백 방식은 커패시터에 저항을 병렬 연결한 수동댐핑과 동일한 특성을 나타내며, 안정도 해석에 $1.5T_s$ 의 연산 및 PWM 시지연을 고려하였다. 주파수 응답 특성과 이산시간 영역에서 근궤적을 이용하여 안정도를 해석하며, 필터 공진을 저감시키기 위한 능동댐핑의 이득 k_d 의 범위를 산정하였으며 PSIM 시뮬레이션과 5kW 계통연계형 실험을 통해 필터 공진에 대한 저감 효과를 검증하였다.

1. 서론

계통연계형 인버터는 스위칭 리플을 저감하기 위해 L필터가 일반적으로 적용되어왔으나, 효과적으로 스위칭 리플을 저감시키기 위해 최근에 LCL필터에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. LCL필터는 비용 절감 및 체적 감소의 장점을 가지지만 LCL필터는 수동소자에 의해 발생하는 필터 공진은 전류제어 수행에 불안정성을 야기할 수 있다. 이러한 필터 공진은 $1.5T_s$ 시스템 시지연을 고려하여 공진주파수가 높은 영역에 존재하면 이득 및 위상여유가 존재하여 안정적인 전류제어 수행이 가능하다.^[1] 그러나 낮은 영역에 공진주파수가 존재하는 경우 안정적인 전류제어를 수행할 수 없으며, 이러한 필터 공진을 저감하기 위해 수동댐핑이나 능동댐핑이 추가적으로 요구된다.^[2] 수동댐핑은 저항에 의해 손실이 발생하는 단점이 있으므로 이 단점을 보완하기 위해 능동댐핑을 적용한다.

본 논문에서는 커패시터 전류 피드백을 이용한 능동댐핑을 적용하여 전류제어를 수행하며, 주파수 응답 특성과 이산시간 영역에서 전류제어 안정도를 해석하며, PSIM 시뮬레이션과 실험을 통해 능동댐핑을 통한 필터 공진의 저감을 검증하였다.

2. 계통연계형 인버터 전류제어 안정도 해석

2.1 LCL 필터 기반 계통연계형 전류제어 안정도 해석

그림 1은 시스템 시지연을 고려한 계통연계형 인버터 전류제어 블록도를 표현하며, 식(1)은 비례 적분 제어기와 시지연 함수를 나타내며, 식 (2)는 인버터 출력전압에 대한 계통 측 전류에 대한 전달함수를 나타낸다. 또한 표 1은 실험 및 시뮬레이션에 적용한 파라미터를 나타낸다.

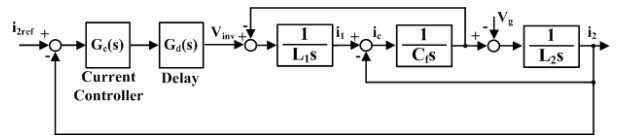


그림 1 LCL 필터 기반 계통연계형 인버터 전류제어 블록도
Fig. 1 Current control block diagram of LCL filter based on grid-connected inverter

$$G_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right), \quad G_d(s) = e^{-15T_s} \quad (1)$$

$$\frac{L_2}{V_{inv}} = \frac{1}{L_1 s} \frac{Z_{LC}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (2)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}}, \quad Z_{LC} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_f}} \quad (3)$$

표 1 계통연계형 인버터 시스템 파라미터
Table 1 Grid-connected inverter system parameter

시스템 파라미터			
정격용량	5kW	L ₁	2.2mH
선간전압	220V _{rms}	L ₂	1.1mH
샘플링 주파수	10kHz	C _f	50uF

그림 2(a)는 LCL 필터 기반의 계통연계형 인버터 전류제어 주파수 응답 특성을 나타내며, 식 (2)을 이용하여 계산한 공진 주파수는 831Hz이며, 충분한 위상 및 이득 여유를 확보하지 못하므로 전류제어 수행의 불안정성을 야기한다.

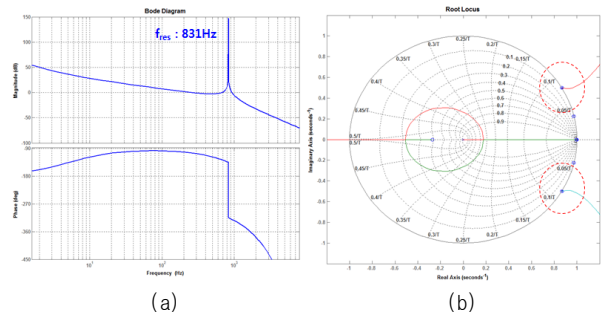


그림 2 LCL필터 기반의 계통연계형 인버터 전류제어 안정도 해석
Fig. 2 Stability analysis of grid-connected inverter current control based on LCL filter

그림 2(b)는 이산시간 영역에서 동일 조건을 이용하여 비례 적분 제어기의 비례 이득 k_p 변화에 따른 근궤적을 이용한 전류제어 안정도 해석 결과를 나타낸다. 공진주파수에 대한 극점은 비례 이득 k_p 가 증가할수록 단위원으로부터 점점 멀어지므로 전류제어는 불안정한 특성을 갖는다. 이러한 조건에서 안정적인 전류제어를 수행하기 위해서는 추가적인 댐핑이 필요하다.

2.2 능동댐핑을 사용하는 LCL 필터 기반 계통연계형 인버터 전류제어 안정도 해석

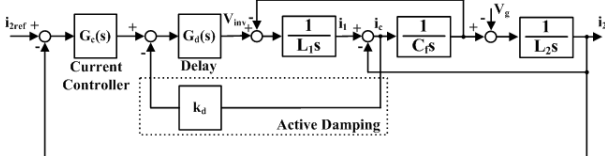


그림 3 LCL 필터 기반 계통연계형 인버터 전류제어 블록도
Fig. 3 Current control block diagram of LCL filter based on grid-connected inverter

그림 3은 능동댐핑 기법을 적용한 계통연계형 인버터 전류제어 블록도를 표현했으며, 비례 적분 제어기 출력에 비례이득을 곱한 커패시터 전류를 피드백 시켜주는 구조이며, 개루프의 전달함수는 식 (4)과 같이 나타낸다. 추가적인 댐핑 성분이 적용됨으로써, 수동소자에 의한 필터 공진을 저감시킬 수 있다.

$$\frac{I_2}{V_{inv}} = \frac{1}{L_1 s} \frac{G_d Z_{LC}^2}{s^2 + G_d \frac{k_d}{L_1} s + \omega_{res}^2} \quad (4)$$

그림 4(a)는 능동댐핑을 사용하는 계통연계형 인버터 전류제어에 대한 주파수 응답 특성을 나타내며, 능동댐핑을 적용함으로써 위상과 이득 여유를 충분히 확보할 수 있다. 그림 4(b)는 이산시간 영역에서 동일 조건을 이용하여 커패시터 전류의 비례이득 k_d 변화에 따른 근궤적을 이용한 전류제어 안정도 해석 결과이며, k_d 의 이득에 따라 단위원 내에 극점이 존재하는 경우 안정적으로 전류제어 수행이 가능하다.

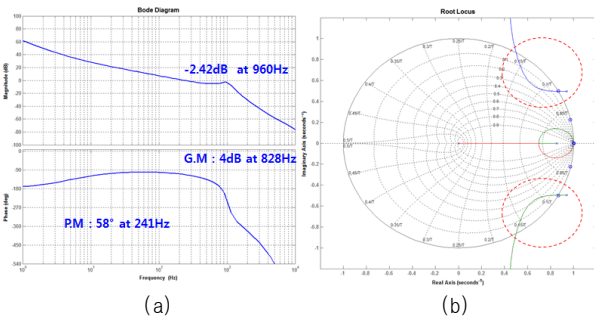


그림 4 LCL 필터 기반의 계통연계형 인버터 전류제어 안정도 해석
Fig. 4 Stability Analysis of Grid-connected inverter Current Control based on LCL Filter

3. 시뮬레이션 및 실험

그림 4는 능동댐핑 여부에 따른 전류제어 시뮬레이션 결과를 나타내며, (a)는 능동댐핑이 적용되지 않은 경우로써 계통측 3상 전류가 발산한다. (b)는 능동댐핑의 비례 이득 $k_d=5$ 가

적용된 경우로써 정격용량이 5kW일 때, 3상 전류가 13.12A_{rms}로써 안정적으로 전류제어를 수행을 확인했다.

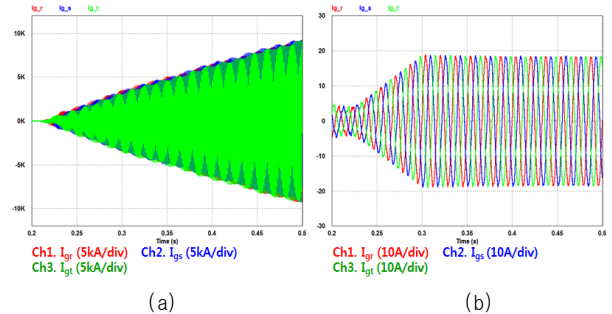


그림 4 능동댐핑에 따른 계통연계형 인버터 전류제어 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation result of grid-connected inverter current control with and without active damping

그림 5는 능동댐핑 여부에 따른 전류제어 실험 결과를 나타내며, (a)는 능동댐핑이 적용되지 않은 경우로써 PWM 스위칭 이후 R상 전류가 120A_{peak}까지 증가하여, 과전류 현상으로 과전류 트립이 발생하였으며, (b)는 능동댐핑이 적용된 경우로써 정격용량이 5kW일 때, 안정적으로 전류제어를 수행한다.

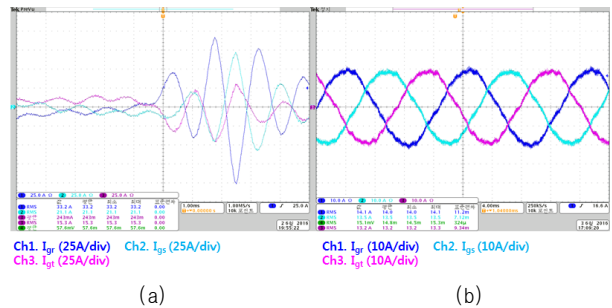


그림 5 능동댐핑에 따른 계통연계형 인버터 전류제어 실험 결과
Fig. 5 Experimental result of grid-connected inverter current control with and without active damping

4. 결론

LCL 필터의 공진주파수가 낮은 영역에서 존재하는 경우 위상 및 이득 여유를 확보할 수 없기 때문에 필터에 의한 공진이 발생하여 전류제어 수행에 불안정성을 야기할 수 있다. 이러한 필터 공진을 저감시키기 위해서 커패시터 전류 피드백 방식을 적용하였으며 근궤적에서의 단위원내에 존재하는 비례 이득 k_d 의 범위를 산정하였으며, 5kW용량에서 공진주파수가 831Hz일 때 시뮬레이션과 실험을 통해 안정적인 전류제어 수행이 가능한 것을 확인했다.

참고 문헌

- [1] 조종민, 이태진, 윤동현. 차한주 “LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 동기좌표계 PI 전류제어 안정도 해석”, 전력전자학회논문지, 제 21권 제2호 pp. 168-174, 2016.4
- [2] Stewart Geoffrey Parker, Brendan P. McGrath, Donald Grahame Holmes. “Regions of Active Damping Control for LCL Filters”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 50, No. 1, pp.424-432, Jan.,Feb. 2014.