

LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 전류제어 안정도 해석 및 검증

조종민, 신창훈, 차한주
충남대학교 전기공학과

Analysis and Verification of Current Control Stability for Grid-connected Inverter with LCL Filter

Jongmin Jo, Chang hoon Shin, Hanju Cha
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 안정적인 전류제어를 위한 공진주파수와 샘플링주파수의 관계 분석을 통해 주파수 및 이산시간영역에서 전류제어 안정도를 해석, 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 능동댐핑을 포함하지 않는 계통전류 제어의 경우, 공진주파수가 샘플링주파수의 1/6 이 되는 f_{base} 보다 높은 영역에 위치하면 안정, 낮은 영역에 위치하면 불안정한 특성을 분석하였고, 공진주파수 변화에 따른 전류제어루프의 안정도 해석을 기반으로 7kW 계통연계형 인버터 Psim 시뮬레이션 및 실험을 통해 동일한 결과를 도출함으로써 주파수간의 관계 분석 및 안정도 해석의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

PWM 인버터를 기반으로 하는 계통연계형 인버터는 스위칭 리플을 저감하기 위해 L 필터가 널리 적용되어 왔다. 그러나, 최근에는 LCL 필터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 다양한 분야에 적용범위를 넓혀가고 있다. LCL 필터는 기존 L 필터보다 더 작은 값의 필터 설계로 스위칭 리플저감에 있어 큰 효과를 갖기 때문에 비용절감 및 체적감소의 장점을 갖는다. 하지만, LCL 필터는 수동소자들에 의한 공진문제를 포함하고 있으며, 이는 전류제어를 수행하는 시스템 전체에 불안정성을 야기할 수 있다. 따라서, 이러한 공진문제를 해결하기 위한 다양한 능동댐핑 방식들에 대한 연구가 지속적으로 진행 중이다. 그러나, LCL 필터의 공진문제에도 불구하고 능동댐핑 적용 없이 계통전류를 제어하는 경우 공진주파수와 샘플링 주파수간의 관계 해석을 통해 공진주파수를 적절한 주파수 영역에 배치하면 공진문제 없이 안정한 전류제어를 수행할 수 있다^{[1][2]}. 두 주파수 간의 관계해석을 통해 공진주파수를 적절한 영역에 배치함으로써 전류제어루프에 공진의 영향을 배제시키고, 위상 및 이득여유를 충분히 확보함으로써 복잡한 제어알고리즘 없이 안정적인 전류제어가 가능하다.

2. LCL 필터기반의 계통연계형 인버터 전류제어

2.1 LCL 필터기반의 계통연계형 인버터 구성

그림 1은 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 구성을 보여준다. 인버터와 계통사이에서 LCL 필터가 위치하며, L_1 은

인버터 측, L_2 는 계통 측 필터 인덕턴스이다. 표 1은 LCL 필터 파라미터이며, 필터 커패시터 C_f 에 따라 공진주파수가 변화함을 알 수 있다. 식 (1)은 공진주파수 수식이다.

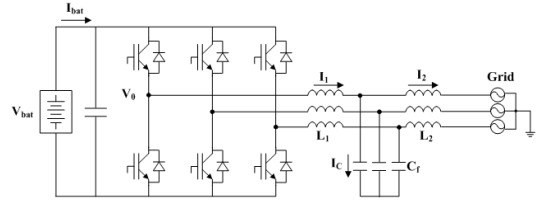


그림 1 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터 구성
Fig. 1 Configuration of grid-connected inverter with LCL filter

표 1 LCL 필터 파라미터
Table 1 Parameters of LCL filter

	L_1	L_2	C_f	f_{res}
조건 1	1.1mH	0.33mH	150uF	815Hz
조건 2	1.1mH	0.33mH	10uF	3.16kHz

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C_f L_1 L_2}} \quad (1)$$

2.2 안정한 전류제어를 위한 f_{BW} , f_{res} , f_s 관계 분석

그림 2는 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터 전류제어루프를 보여준다. 제어대상은 계통 측 전류(I_2)이고 s 도메인 상에서 표현된 PI 제어기, 시스템 위상지연 및 LCL 필터 전달함수로 구성되며 식 (2) (4)로 표현된다. 식 (5)는 전류제어루프의 개루프 전달함수이다. 시스템 위상지연은 DSP 연산 및 PWM으로부터 발생하는 모든 위상지연 성분을 고려하였다.

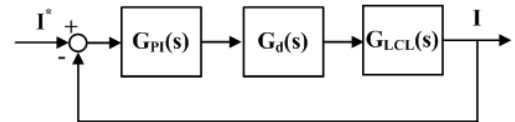


그림 2 LCL 필터를 사용하는 전류제어루프
Fig. 2 Current control loop with LCL filter

$$G_{PI}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2)$$

$$G_d(s) = e^{-s * 1.5T_s} \quad (3)$$

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{sL_1} * \frac{z_{LC}^2}{s^2 + w_{res}^2}, z_{LC} = \sqrt{(L_2 C_f)^{-1}} \quad (4)$$

$$G_{openloop} = G_{PI}(s) G_d(s) G_{LCL}(s) \quad (5)$$

제어기 이득 및 대역폭은 L 필터기반의 극점 영점 상쇄기법을 적용하여 산정하였으며, 대역폭 f_{BW} 는 일반적으로 f_{res} 보다 낮은 주파수에 위치한다. 전류제어의 개루프 전달함수 위상이 180° 가 되는 주파수는 샘플링주파수의 1/6 지점(f_{base})이 된다. f_{res} 가 f_{base} 보다 높은 영역에 존재하면 전류제어루프는 충분한 위상 및 이득여유를 확보함으로써 안정한 전류제어가 가능하다. 그러나, f_{res} 가 f_{base} 보다 낮은 영역에 위치하면 LCL 필터의 공진특성에 의해 전류제어는 불안정한 시스템이 된다. 식 (6)은 안정한 전류제어를 위한 주파수 관계를 나타낸다.

$$f_{BW} < \frac{f_s}{6} (= f_{base}) < f_{res} < \frac{f_s}{2} \quad (6)$$

2.3 LCL 필터 전류제어루프 안정도 해석

그림 3은 $f_s=10\text{kHz}$ 일 때, 조건 1의 주파수 응답 안정도 해석결과로써 f_{res} 가 f_{base} 보다 낮은 주파수영역에 존재하므로 위상 및 이득여유를 확보하지 못함으로써 불안정한 특성을 나타낸다. 그러나, 그림 4는 조건 2에 대한 안정도 해석결과로 f_{res} 가 f_{base} 보다 높은 주파수영역에 존재하므로 충분한 위상 및 이득여유를 확보함으로써 안정한 전류제어특성을 보인다. 그림 5는 이산시간영역에서의 안정도 해석으로 주파수 응답특성과 동일한 안정도 결과를 나타낸다.

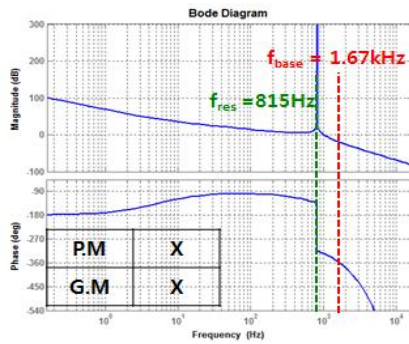


그림 3 조건 1 ($f_{res} < f_{base}$)의 주파수 안정도 해석
Fig. 3 Analysis of frequency stability under condition 1

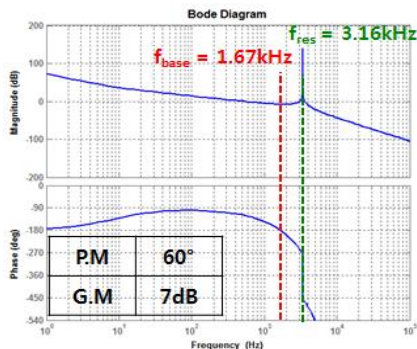
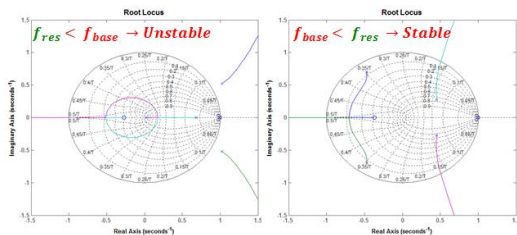


그림 4 조건 2 ($f_{base} < f_{res}$)의 주파수 안정도 해석
Fig. 4 Analysis of frequency stability under condition 2



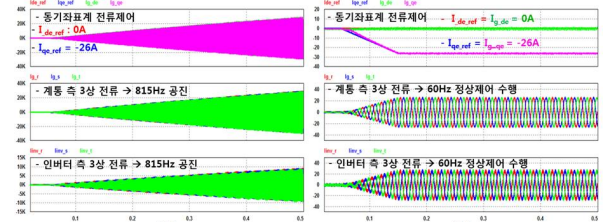
(a) 조건 1 ($f_{res} < f_{base}$) (b) 조건 2 ($f_{base} < f_{res}$)

그림 5 조건 1, 2의 이산시간 안정도 해석
Fig. 5 Analysis of discrete time stability under condition 1, 2

2.4 시뮬레이션 및 실험결과

그림 6은 조건 1, 2에 해당하는 LCL 필터 파라미터를 갖는 7kW 계통연계형 인버터 Psim 시뮬레이션 결과파형이다. 조건 1의 경우 전류는 LCL 필터 공진주파수 815Hz 성분을 갖고 발산하는 공진문제로 인해 시스템이 불안정하지만, 조건 2의 경우 안정한 60Hz 기본파 성분을 정상적으로 제어함을 확인할 수 있다. 2.3절의 안정도 해석과 동일한 결과임을 알 수 있다.

그림 7은 시뮬레이션과 동일한 LCL 파라미터 조건에서의 7kW 계통연계형 인버터 실험결과이다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 조건 1은 LCL 필터 공진문제로 인해 전류의 크기가 증폭되어 발산함에 따라 과전류 트립이 발생하는 불안정한 특성을 갖으나, 조건 2는 시뮬레이션과 동일하게 안정한 60Hz 기본파 전류제어를 수행함을 실험결과를 통해 검증하였다.



(a) 조건 1 ($f_{res} < f_{base}$) (b) 조건 2 ($f_{base} < f_{res}$)

그림 6 조건 1, 2의 경우 Psim 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Psim simulation results under condition 1, 2

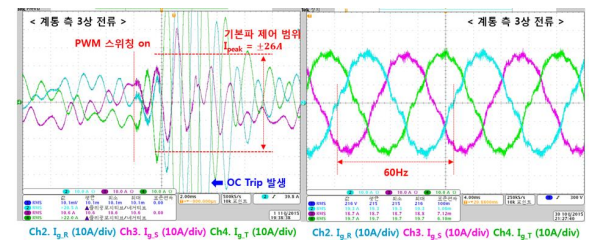


그림 7 조건 1, 2의 경우 실험결과
Fig. 7 Experimental results under condition 1, 2

3. 결론

본 논문에서는 LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 안정한 전류제어를 수행하기 위해 제어기 대역폭, 공진주파수 및 샘플링주파수 간의 관계를 분석하고, 주파수 및 이산시간영역에서의 전류제어루프 안정도를 해석하였다. 공진주파수 f_{res} 가 f_{base} 보다 높은 주파수영역에 위치하면 안정, 낮은 주파수영역에 존재하면 불안정한 전류제어루프의 안정도 해석결과를 7kW 계통연계형 인버터 Psim 시뮬레이션 및 실험을 통해 동일한 결과를 도출하였다. 따라서, 안정한 전류제어를 수행하기 위한 주파수간의 관계 해석 및 안정도 분석의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Parker, S.G, McGrath, B.P, Holmes, D.G, "Regions of Active Damping Control for LCL Filters", Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 50, No. 1, pp. 424-432, 2014, Jan.
- [2] Dannehl, J, Wessels, C, Fuchs, F.W, "Limitations of Voltage Oriented PI Current control of Grid Connected PWM Rectifiers With LCL Filters", Industrial Electronics, IEEE Transactions, Vol. 56, No. 2, pp. 380-388, 2009, Feb.