

LCL 필터의 공진 억제를 위한 SRF-PLL 기반의 공진 주파수 추종 기능을 갖는 적응형 노치 필터

임재성, 홍다현, 차헌영
경북대학교

Adaptive Notch Filter with Resonant Frequency Tracking Based on SRF-PLL for Suppressing Resonance in LCL filter

Jaeseong Lim, Daheon Hong, Honnyong Cha
Kyungpook National University

ABSTRACT

LCL 필터는 L 필터에 비해 작은 부피와 우수한 고조파 감쇄 효과로 계통 연계형 인버터에 널리 쓰인다. 하지만 LCL 필터의 공진에 의해 시스템의 안정성이 저하된다. 안정화를 위한 여러 공진 억제 기법 중, 노치 필터를 이용한 억제 기법은 추가적인 센서나 손실을 가지지 않는 장점이 있으나 계통의 임피던스 및 필터 커패시터의 변화로 공진 주파수와 노치 주파수가 불일치한 경우, 시스템이 불안정해질 수 있다. 본 논문에서는 LCL 필터의 공진을 억제하기 위한 SRF-PLL (Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop) 기반의 공진 주파수 추종 기능을 갖는 적응형 노치 필터에 대해 제안한다. 제안하는 적응형 노치 필터는 공진 발생 시, 계통 전류의 공진 성분에 대해 SRF-PLL을 적용하여 공진 주파수를 추종하고 노치 주파수를 조정함으로써 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다.

1. 서론

LCL 필터는 IEEE-519와 같은 계통 전류의 고조파 규격을 만족하기 위해 계통 연계형 인버터 혹은 컨버터에 주로 적용된다. L 필터에 비해 작은 부피와 우수한 고조파 감쇄 능력을 갖지만 필터 인덕터와 커패시터의 공진에 의해 시스템의 안정성이 저하된다는 단점이 존재한다.

공진에 의한 시스템의 불안정성을 해결하기 위해 여러 가지 댐핑 기법이 제안되었다. 수동 댐핑 기법은 필터 커패시터에 직렬로 저항을 추가함으로써 안정성을 높이는 댐핑 기법이지만, 저항에서 발생하는 손실로 인해 높은 효율이 요구되는 사양에는 적합하지 않다. 능동 댐핑 기법은 손실 없이 안정성을 높이는 기술로 필터 커패시터의 전압 혹은 전류를 이용한 피드백 방식, 노치 필터나 위상 앞섬 보상기를 이용한 필터 기반의 방식, 상태 관측기를 이용한 방식들이 제안되어 왔다^[1].

피드백 방식의 댐핑 기법은 커패시터의 정보를 사용하기 위해 추가적인 센서가 요구된다. 상태 관측기를 이용한 방식은 센서를 요구하지 않으나 제어기 설계와 구현이 복잡하며 많은 연산량을 필요로 한다. 노치 필터를 이용한 댐핑은 구현이 간단하지만 계통 임피던스의 변화로 노치 주파수와 공진 주파수의 차이가 발생할 경우, 안정성이 향상되지 않는다. 본 논문에서는 두 주파수의 불일치로 공진 발생 시, 계통 전류에 SRF-PLL을 적용하여 공진 주파수를 추종하고 노치 주파수를 조정하는 적응형 노치 필터를 제안한다.

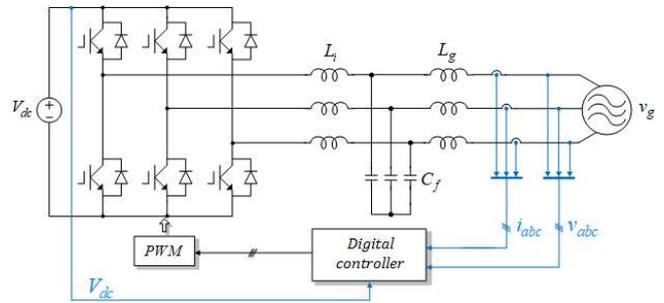


그림 1 LCL 필터가 적용된 3상 계통 연계형 인버터.
Fig. 1 Three-phase grid-connected inverter with an LCL filter.

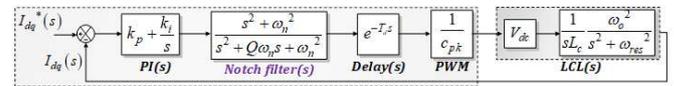


그림 2 계통측 전류 제어 블록 다이어그램.
Fig. 2 Grid-side current control structure.

2. 본론

2.1 노치 필터가 적용된 3상 인버터 모델링

그림 1은 LCL 필터가 적용된 3상 계통 연계형 인버터를 나타낸다. 계통 전류의 디지털 제어 시, 영차 유지(zero-order hold)와 연산 시간의 지연으로 인해 시스템의 안정도에 영향을 줄 수 있다. 그림 2는 노치 필터가 적용된 계통 측 전류 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. LCL 필터의 전달함수는 식 (1)과 같으며 ω_o 와 ω_{res} 는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$LCL(s) = \frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{sL_i} \frac{\omega_o^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (1)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_g C_f}}, \omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (2)$$

$$Notch(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + Q\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

또한, 노치 필터의 전달함수는 식 (3)과 같으며 Q는 노치 필터의 대역폭을 나타낸다. 시스템의 안정도는 보드 선도를 이용하

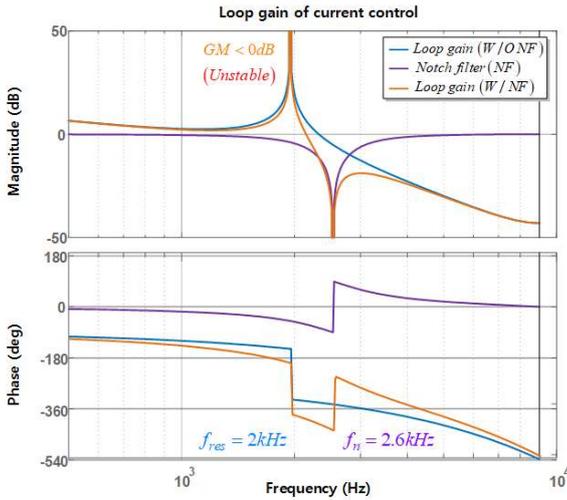


그림 3 notch 필터가 적용된 전류 제어 시스템의 보드선도
(노치 주파수:fn=2.6kHz, 공진 주파수:fres=2kHz)
Fig. 3 Bode plot of loop gain of current control with notch filter (notch frequency:fn=2kHz, resonant frequency:fres=2.6kHz)

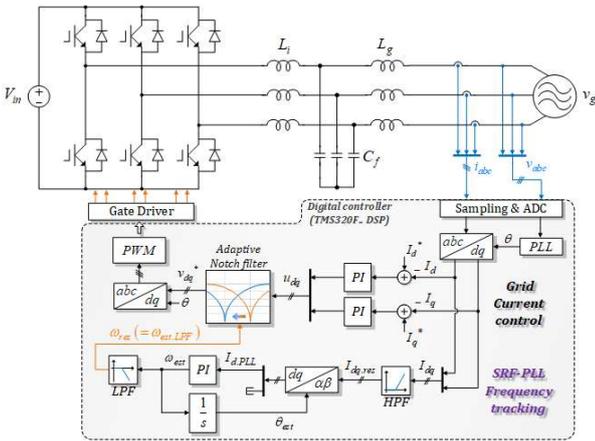


그림 4 제안하는 적응형 notch 필터
Fig. 4 Proposed adaptive notch filter

표 1 실험 사양
Table 1 Experimental specifications

Grid line to line voltage($v_{g,ll}$)		$50 V_{rms}$
Grid frequency(f_g)		$60 Hz$
DC link voltage(V_{dc})		$180 V$
Switching frequency(f_{sw})		$18 kHz$
LCL filter	Grid-side inductor(L_g)	$0.25 \sim 0.5 mH$
	Inverter-side inductor(L_i)	$1 mH$
	Filter capacitor(C_f)	$20 \mu F$
	Resonant frequency(f_{res})	$2.1 \sim 2.54 kHz$

여 개루프 이득의 크기, 위상 여유를 나타내는 상대 안정도를 통해 판별한다. 두 주파수가 불일치한 경우 (그림 3 참고), 공진 성분이 저감되지 않고 전류 제어 시스템의 개루프 이득에서 크기 여유를 확보할 수 없으므로 시스템이 불안정해진다.

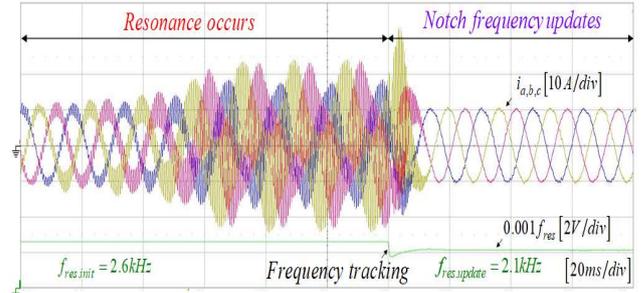


그림 5 실험 파형
Fig. 5 Experimental waveforms

2.2 제안하는 적응형 notch 필터

그림 4는 제안하는 적응형 notch 필터를 나타낸다. 계통 전류의 공진 발생 시, 고주파 대역 통과 필터(high pass filter)를 이용하여 기본파 성분을 제외한 공진 주파수 성분을 통과시킨다. 공진 주파수 성분에 대한 동기좌표계 위상각 검출을 통해 계통 전류의 공진 주파수 성분을 검출할 수 있으며, dq축 공진 전류의 크기 불일치로 발생하는 공진 주파수의 2배 성분은 저주파 대역 통과 필터(Low pass filter)를 이용하여 감쇄시킨다. 추종된 공진 주파수와 같게 notch 주파수를 조정함으로써 notch 주파수와 공진 주파수를 일치시키게 된다.

2.3 실험 사양 및 결과

본 논문에서는 표 1에 명시된 사양에 맞춰 제안하는 적응형 notch 필터의 성능을 검증하였다. 계통과 연계하기 위하여 3상 변압기, VARIAC(Variable AC autotransformer)을 이용하였으며 VARIAC을 통해 계통 전압을 증가시킬 시, 계통 측 인덕턴스 성분이 계통 전압에 비례하여 증가된다. 그림 5는 실험 파형을 나타낸다. 초기의 notch 주파수는 2600Hz로 설정을 하였다. 계통 선간 전압을 50Vrms로 증가시킬 시, 계통 측 인덕턴스 성분이 증가하고 공진 주파수가 2100Hz로 감소하여 두 주파수의 불일치로 공진이 발생하였다. ADC를 이용하여 공진 주파수 추종을 확인하였으며 notch 필터에 업데이트 된 후, 공진이 억제되는 것을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 SRF-PLL 기반의 공진 주파수 추종 기능을 갖는 적응형 notch 필터를 제안하였다. notch 주파수와 공진 주파수의 불일치로 계통 전류의 공진이 발생할 경우, 복잡한 기법과 계산 없이 계통 전류의 공진 주파수 성분만을 검출하고 notch 주파수를 조정함으로써 공진을 억제한다. 제안하는 notch 필터의 성능을 시제품 실험으로 검증하였다.

참고 문헌

- [1] J. Xu and S. Xie, "LCL-resonance damping strategies for grid-connected inverters with LCL filters: a comprehensive review," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 292-305, 2018, March