

계통연계형 인버터용 LCL 필터의 센서리스 능동 댐핑 기법

성원용, 안정훈, 안효민, 이병국[†]
성균관대학교 정보통신대학

Sensorless Active Damping Method of LCL Filter for Grid-connected Inverter

Won Yong Sung, Jung Hoon Ahn, Hyo Min Ahn, Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

계통연계형 인버터는 출력 전류의 고조파 저감을 위해 L 또는 LCL 필터를 사용된다. L 필터에 비해 LCL 필터가 동일 인덕턴스로 높은 고조파 저감 효과를 가지기 때문에 일반적으로 LCL 필터를 이용하지만, 시스템에 공진이 발생하기 때문에, 이를 해결하기 위해 다양한 댐핑 기법과 함께 사용되어왔다. 특히, 능동 댐핑 기법은 추가적인 수동소자가 필요 없기 때문에, 수동 댐핑 기법에 비해 손실이 적다는 장점이 있으나, 추가적인 센싱회로가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 추가적인 센서가 필요없는 3상 계통연계 인버터용 LCL 필터의 능동 댐핑 기법을 제안한다. 일반적인 계통연계 인버터에서 센싱받는 계통전압과 계통전류를 이용하여 캐패시터 전류를 계산하고, 이를 전류제어 루프에 보상함으로써 가상 저항 능동 댐핑 기법을 구현하고, 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

계통연계형 인버터는 PWM 스위칭으로 인해 출력 전류에 고조파가 발생하게 되며, 이는 계통품질에 악영향을 주기 때문에 저역통과 필터인 L 필터 또는 LCL 필터를 통해 고조파를 저감한다. LCL 필터는 L 필터에 비해 작은 인덕턴스로도 동일한 효과를 가질 수 있다는 장점이 있기 때문에, 계통연계 인버터에 일반적으로 사용되는 추세이다. 하지만, LCL 필터는 L 필터에 비해 추가적으로 LC 필터를 추가한 형태이기 때문에, 특정 주파수에서 임피던스가 매우 낮아지게 되어 공진 현상이 발생하게 되며, 이는 시스템의 불안정을 야기한다. 따라서 이를 해결하기 위해 많은 댐핑 기법이 연구되어 왔으며, 크게 수동 댐핑 기법과 능동 댐핑 기법으로 나뉘어진다. 수동 댐핑 기법은 LCL 필터에 수동소자를 직병렬로 연결하는 방법으로, 구현이 간편하다는 장점이 있으나, 댐핑 저항에서 발생하는 손실로 인해 시스템 효율이 저하된다는 단점이 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 제어기의 구조를 변형하는 방법인 능동 댐핑 기법에 대한 연구가 진행되어왔다. 능동 댐핑 기법은 가상 저항 기법이 주로 사용되며, 이를 구현하기 위해 추가적인 전압 또는 전류센서를 필요로 하는 단점이 있다.^[1]

본 논문에서는 추가적인 센서 없이 계통전압과 계통측 인덕터 전류를 이용하여 가상 저항 기법을 구현 및 분석하고, 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

2. 센서리스 가상 저항 기법

2.1 가상 저항 기법

LCL 필터는 특정 주파수에서 임피던스가 매우 낮아지는 공진 주파수를 가지며, 공진 주파수에서는 위상이 180도가 되어 이득 여유가 음이 되어 제어 안정도가 떨어진다. 그러므로, LCL 필터의 공진을 억제 시킬 수 있는 댐핑 기법이 적용되어야 한다.

가상 저항 기법은 LCL 필터의 캐패시터에 병렬로 저항을 연결한 것과 동일한 효과가 나타나도록 제어기에 보상해주는 기법이다. 그림 1은 가상 임피던스가 적용된 LCL 필터를 보여준다. 가상 임피던스 (Z_V)은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_V = \frac{L_i}{C_f H_V} \quad (1)$$

L_i 는 인버터측 인덕턴스, C_f 는 필터 캐패시터, H_V 는 보상함수를 나타낸다. 즉, H_V 가 비례제어기일 경우, Z_V 는 댐핑저항처럼 동작하게 된다.

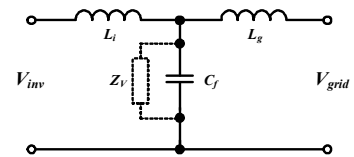


그림 1 가상 임피던스가 적용된 LCL 필터
Fig. 1 LCL filter with virtual impedance

그 결과 LCL 필터의 어드미턴스는 식(2)와 같이 변경된다.

$$Y_{LCL} = \frac{V_{\in v}}{i_{Lg}} = \frac{1}{s^3 L_g L_i C_f + s^2 L_i L_g / Z_v + s(L_i + L_g)} \quad (2)$$

이는 필터 캐패시터에 임피던스 Z_V 를 가진 수동소자를 병렬로 연결한 것과 동일한 효과로 나타난다.

2.2 캐패시터 전류 추정

가상 저항 능동 댐핑 기법은 캐패시터 전류 또는 캐패시터 전압의 추가적인 센싱을 필요로 한다. 하지만 본 논문에서는

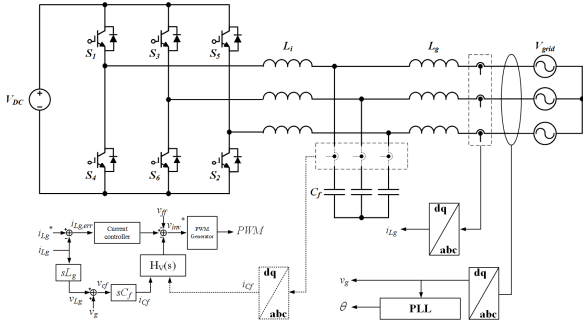


그림 2 시스템 제어 블록도
Fig. 2 System control block diagram

계통연계 인버터에서 기본적으로 센싱 받는 계통측 인덕터 전류와 계통전압을 이용하여 캐패시터 전류를 추정함으로써 추가적인 센서를 제거할 수 있다. 아래의 식을 통해 캐패시터 전류를 추정할 수 있다.

$$V_{Lg} = sL_g i_{Lg} \quad (3)$$

$$V_{Cf} = V_{Lg} + V_g \quad (4)$$

$$i_{Cf} = sC_f V_{Cf} \quad (5)$$

그림 2는 제안한 캐패시터 전류 추정방법이 적용된 계통연계 인버터의 시스템 제어블록도이다. 기존의 경우, 점선으로 나타낸 것처럼 필터 캐패시터에 전류센서를 연결하여 센싱받아야 했으나 본 논문에서 제안한 방법을 이용할 경우, 추가적인 센싱이 없이 가능하다.

2.3 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 캐패시터 전류 추정 기법을 적용한 가상 저항 능동 댐핑 기법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 구성하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 그림 3은 본 논문에서 제안한 캐패시터 전류 추정 기법을 이용한 가상 저항 능동 댐핑 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 시뮬레이션 파형이다. 0.4s에서부터 액티브 댐핑이 적용되며, 10kW 부하에 적용하였다. 시뮬레이션 결과 공진 주파수에서의 고조파가 효

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

V_{DC}	650 V	V_g	380 V _{LL}
L_g	300 μ H	L_i	800 μ H
C_f	4.7 μ F	H_z	1
Z_V	170.2 Ω	f_{sw}	20 kHz

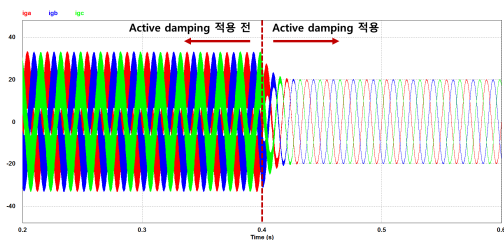
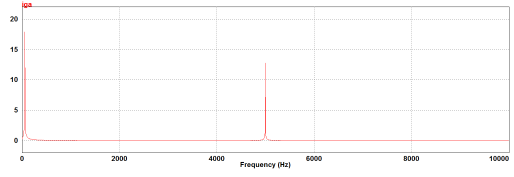
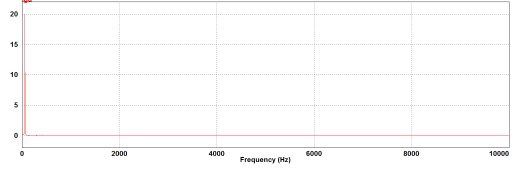


그림 3 능동 댐핑이 적용된 인버터 출력 전류
Fig. 3 Inverter output current with active damping

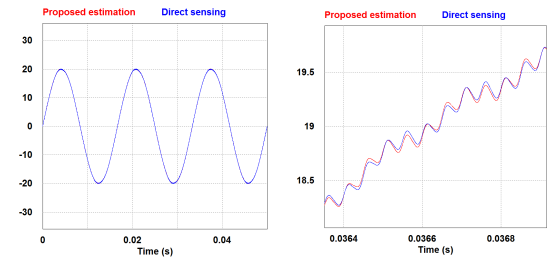


a 능동댐핑 적용 전



b 능동댐핑 적용 후

그림 4 인버터 출력전류의 FFT 분석
Fig. 4 FFT analysis of inverter output current



a 계통전류 파형 b 확대한 파형

그림 5 기존의 방식과 제안된 방식의 출력전류
Fig. 5 Output current of conventional and proposed case

과적으로 제거되는 것을 알 수있다. 또한 그림 4와 같이 FFT를 수행한 결과 공진 주파수에서의 성분이 제거되었다.

그림 5는 기존의 방식과 제안된 캐패시터 전류 추정방식을 적용했을 때의 출력 전류이다. 제안된 방식이 기존의 방식에 비해 위상 지연이 있지만, 샘플링 4주기만큼의 딜레이가 있으므로, 충분히 높은 샘플링 주파수를 확보되었을 때, 기존의 방식과 동등한 성능의 확보가 가능한 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 추가적인 센서 없이 가상 저항 기법을 구현하기 위한 캐패시터 전류 센싱 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 이용할 경우, 추가적으로 전압 또는 전류 센싱회로 없이도 공진성분을 억제할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 센서가 있는 경우와 동등한 성능을 낼 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] D. Pan, X. Ruan, C. Bao, W. Li, and X. Wang, "Capacitor current feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL type grid connected inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 7, pp. 3414-3427, Jul. 2014.

[2] J. He and Y. W. Li, "Generalized closed loop control schemes with embedded virtual impedances for voltage source converters with LC or LCL filters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 4, pp. 1850-1861, Apr. 2012.