

비선형부하시 인버터 제어성능 향상을 위한 APF 다단 적용

정하용, 김기두, 반충환, 임승범, 류지수
주식회사 이온

Cascade connection of APF to improve inverter control performance under non-linear loads

Ha-Yong Jeong, Ki-Du Kim, Choong-Hwan Ban, Seung-Beom Lim, Ji-Su Ryu
EON Co.,Ltd

ABSTRACT

When a non-linear load is applied to a three-phase inverter system, 6 harmonic ripples occur in the current component of the synchronous coordinate system. The output voltage THD can be improved through control to remove this 6th harmonic ripple. When applying each phase control in a single-phase or three-phase system, APF (All Pass Filter) is used to obtain a waveform whose phase is shifted by 90 degrees during coordinate conversion. APF can obtain a waveform with a 90-degree phase shift if the waveform is a sine wave, but if the waveform contains many harmonics other than a sine wave, a waveform with only a 90-degree phase shift cannot be obtained. In this paper, we propose a multi-stage APF application method to obtain a waveform with a 90-degree phase shift when the waveform is not a sinusoidal waveform.

1. 서론

전압원 인버터(VSD)는 분산전원용 PCS, 교류 전동기 구동, 무정전 전원장치(UPS), 무효전력 보상 장치, 전압보상기 등의 다양한 목적으로 사용되고 있다.

3-Level 인버터의 경우 두 개의 스위치가 하나의 암(arm)으로 구성되어 있으며, 두 개의 스위치는 상보적으로 스위칭 동작을 한다. 스위칭 동작을 하는 과정에서 이상적인 계통 전압은 정현파로 나타나지만, 실제의 계통 전압에는 비선형부하등으로 인해 주로 전원 주파수의 배수 형태인 5차, 7차, 11차 및 13차등 고조파 성분이 포함되어 있다. 이 중에서 계통 전압의 고조파는 정자 좌표계 $d-q$ 축 전류에 5차 및 7차 고조파와 동기 좌표계 $d-q$ 축 전류에 6차 고조파로 나타나고, 이로 인해 전압의 왜곡을 발생시킨다.^[1]

고조파로 인한 전압의 왜곡을 감소하기 위해, 인버터의 제어를 통한 고조파 소거 기법이 다양하게 연구되었다. 동기 좌표계를 이용하여, 6차 고조파의 제어를 통한 저차 고조파 소거 기법이 그중 하나이다. 5차 및 7차의 저차 고조파 성분이 동기 좌표계 상에서 6차 고조파 성분으로 나타난다는 특성을 이용하여 6차 고조파 제어를 통해 저차 고조파를 저감 한다. 이는 연상량이 적고 제어가 간편하다는 장점이 있다.^[2]

APF(All Pass Filter)를 적용할 경우, 동기 좌표계에서 6차

고조파 성분을 확인할 수 있지만, 비선형부하의 경우 APF에 의한 정확한 Phase Shift가 이뤄지지 않는다. 따라서, 6차 고조파 성분에 대해서 확인이 힘들다는 문제가 있다.

본 논문에서는 비선형부하에서 APF를 사용하면 동기좌표계에서 6차 고조파에 의한 출력전압 왜곡이 발생한다. 6차 고조파를 보상하기 위해, 한 번에 90도의 Phase Shift하지 않고, APF를 다단 적용시켜 6차 고조파를 보상할 수 있는 방법에 대하여 시뮬레이션을 이용하여 타당성을 검증한다.

2. 다단 적용 All Pass Filter

2.1 All Pass Filter

인버터 시스템에서 APF(All Pass Filter)는 좌표변환을 이용하여 제어를 할 때, 사용한다. 3상에서 단상 정지좌표계로 변환을 하고, 단상 정지좌표계에서 단상 동기좌표계로 변환을 하여 제어를 한다. 동기좌표계로 $d-q$ 변환을 하게되면, 90도의 위상차가 발생한다. APF의 특징은 주파수와 상관없이 차단 주파수에서 실제 전류인 d 축 전류의 크기 감쇄 없이 90도 위상 지연이 발생한다. APF의 전달함수는 식(1)과 같이 나타내고, 보드 선도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(s) = \frac{s^2 - \sqrt{2}w_o s + w_o^2}{s^2 + \sqrt{2}w_o s + w_o^2} \quad (1)$$

선형부하인 정현파에서는 APF를 사용하면, 90도의 Phase

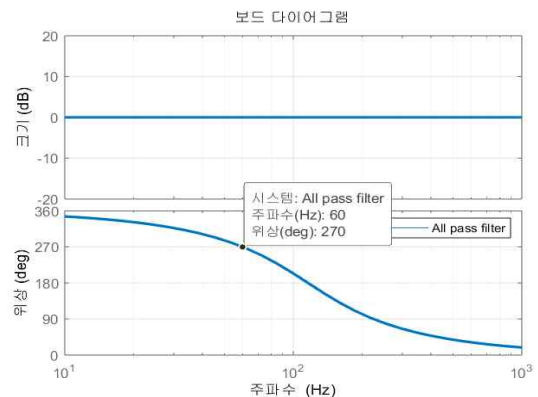


그림 1 단일의 APF를 적용한 보드선도
Fig. 1 Bode diagram with single APF applied

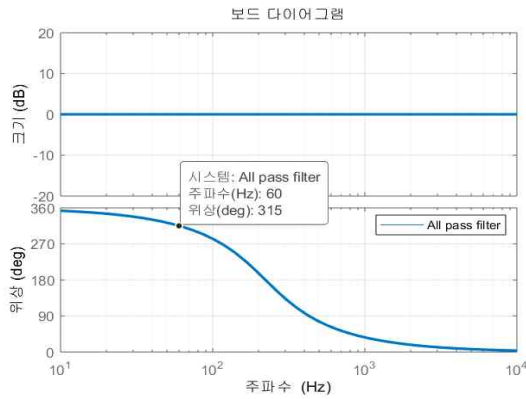


그림 2 다단 APF를 적용한 보드선도
Fig. 2 Bode diagram with cascade of APF applied

Shift가 이루어져, 동기 좌표계에서 원하는 제어를 할 수 있지만 비선형부하에서는 고조파가 포함되어 왜곡된 파형이 나온다. 해당 고조파는 동기 좌표로 확인했을 때, 6차 고조파 성분을 확인할 수 있다. 그림2의 경우 APF를 다단 적용하기 위하여, 하나의 APF를 45도로 적용한 보드 선도이다.

2.1 시뮬레이션

APF를 다단 적용 후 정지좌표계와 동기 좌표계에서의 고조파 성분의 변화를 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션은 2-Level 인버터 회로와 C-Block을 이용하여, APF를 적용하여 진행한다. 시뮬레이션 결과는 그림 3은 비선형부하에서 단일 APF를 적용한 파형이다. 위쪽 파형이 정지좌표계, 아래 파형이 동기 좌표계로 변환한 파형이다. 먼저 정지좌표계에서 보면 q 축의 파형이 90도의 위상 전이가 된다. 위상 전이 과정에서 파형의 왜곡이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 해당 성분을 동기좌표계로 보면 6차 고조파의 성분을 확인할 수 없다. 그림 4는 APF를 다단 적용한 파형이다. 마찬가지로 정지좌표계에서 90도의 위상 전이가 하였고, 파형의 왜곡이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 동기 좌표계로 확인을 해보면, 단일 APF를 적용한 파형과 다르게, 다단 APF를 적용하면 파형의 한 주기에 고조파 성분이 6차 고조파의 성분을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 해당 시뮬레이션을 통하여 확인했듯이, 다단 APF를 적용하면 6차 고조파 성분을 구분하여, 6차 고조파를 감쇄시킬 수 있는 제어기를 사용하면, 출력전압의 왜곡을 줄여 THD를 감소시킬 수 있다. 그림 5는 인버터 시스템에 APF를 다단 적용하여, 인버터의 최종 출력전압 및 출력전류 파형을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다. 같은 제어기를 사용하였을 경우, 단

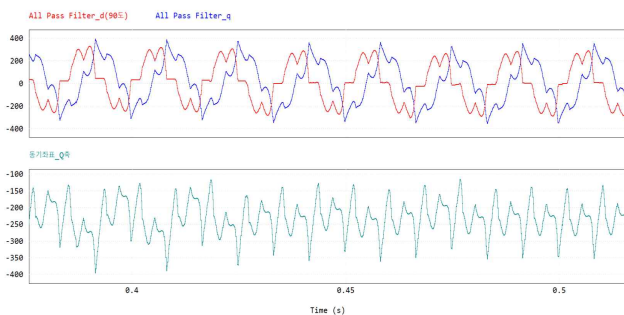


그림 3 단일 APF를 적용한 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Simulation waveform with single APF applied

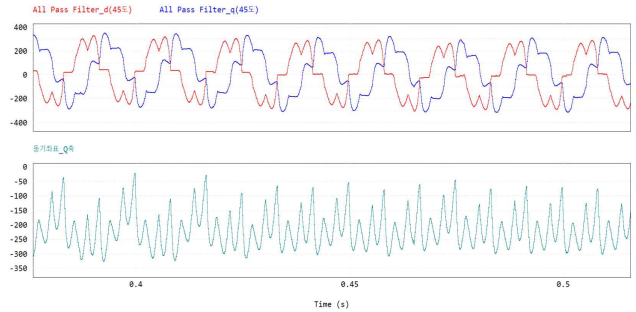


그림 4 다단 APF를 적용한 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveform with cascade APF applied

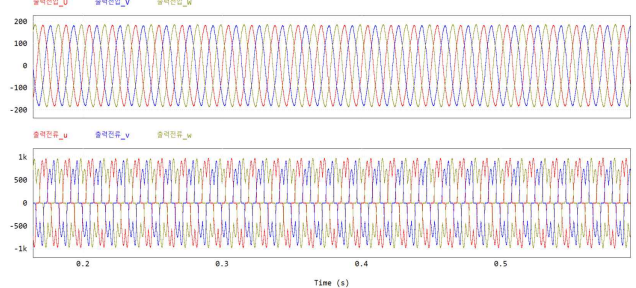


그림 5 다단 APF를 적용 후 출력 전압, 전류 파형
Fig. 5 Output voltage and current waveforms after applying multi-stage APF

일 APF를 적용한 파형보다 다단 APF의 출력전압 왜곡이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 삼상 인버터 시스템에서 비선형부하 인가 시, 동기 좌표계에서 6차 고조파로 인한 출력전압 왜곡이 발생한다. 동기 좌표계를 이용하여 출력제어를 할 때, APF를 한 번만 적용하면 파형에서 6차 고조파 성분이 나타나지 않아, 출력전압을 제어하기 어려운 단점이 있지만, APF의 다단 적용을 통해 6차 고조파의 성분을 나타낸 후 6차 고조파를 상쇄시키는 제어기를 적용하여, 출력전압에 대한 왜곡을 줄여 THD를 감소시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원(No.2022202080050)과 한국산업기술진흥원(KIAT)의 “지역혁신클러스터육성(R&D)(P0025363)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임

참고 문헌

- [1] 신지욱, “계통연계형 3-레벨 NPC 인버터의 6차 고조파 제어 기법을 이용한 계통 전류 고조파 저감”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 66, No. 5, pp. 778-785, 2017.
- [2] 안상원, “대역 통과 필터를 이용한 3상 계통 연계 인버터의 저차 고조파 소거 기법”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 69, No. 1, pp. 27-36, 2020.