

# 고조파 보상을 위한 계통연계형 인버터 제어기 설계

신찬호, Simatupang Desmon Petrus, 최재호  
충북대학교

## Controller Design of Grid-Connected Inverter to Compensate Harmonics

Chanho Sin, Desmon Petrus Simatupang, Jaeho Choi  
Chungbuk National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 계통연계 인버터가 액티브 파워 필터로 동작할 때 비선형부하에 의해 발생하는 고조파를 보상하는 제어기 설계에 대해 다룬다. 고조파 보상 기능을 포함하는 계통연계형 인버터의 제어기는 PR제어기 기반의 멀티루프 전류제어기를 사용한다. 각각의 제어기는 시스템 특성 및 안정도를 고려하여 설계되고 시뮬레이션 및 실험으로 타당성을 입증한다.

### 1. 서론

고조파 전류를 보상하기 위해 수동필터와 능동필터에 대한 연구가 많이 진행되었다. 하지만 수동필터는 각 차의 주파수마다 설치해야 하는 불편함이 있고 과부하에 의한 과열 및 소손의 우려가 있고 능동필터는 보상하고자 하는 부하에 병렬로 접속되어 사용되는데 이 경우에도 비용적인 문제점이 발생하게 된다. 수동필터와 능동필터의 단점을 보완하기 위해서 최근 분산발전 기반의 계통연계 인버터가 적절한 제어를 통해서 고조파를 보상하는 방식에 대한 연구가 진행되었다. 이와 같은 방식은 기존의 분산발전 시스템이 계통이나 부하로 전력을 공급하는 방식에 고조파 보상 기능이 추가된 형태를 말한다. 고조파 전류를 보상하기 위해서는 부하의 전류 고조파를 정확히 검출하여 적용하는 것이 중요하고 그렇기 때문에 고조파 검출 방법이 많이 연구되었다. 하지만 이런 방식들은 제어기의 연산을 증가시키는 단점을 가지고 있다.

이를 해결하기 위해 최근 하이브리드 전압 및 전류제어 방식이 고조파 검출 없이 비선형부하의 고조파 보상이 가능하도록 제안되었다. 이때 기본파에 대한 전류레퍼런스는 전력 레퍼런스에 의해 계산되어진다. 기존의 전류레퍼런스는 고정된 값의 리플이 없는 전압으로 가정하여 결정되었다. 하지만 PoC (Point of Connection) 전압이 배전 계통의 전력 흐름의 변동에 민감한 것을 고려했을 때 전류레퍼런스의 오차를 야기시킬 수 있다. 이러한 전류레퍼런스의 오차는 고조파 보상 기능에 영향을 줄 수 있다.

이를 해결하기 위해 [1]에서는 기본파와 고조파에 대한 2개의 제어지점을 갖는 전류제어기를 제안하였다. 제어기는 기본파 전류제어와 비선형부하의 고조파 전류를 보상할 수 있는 고조파 보상 제어기로 구성되었다. 이는 기본파 레퍼런스와 고조파 레퍼런스가 독립적이기 때문에 고조파 레퍼런스가 기본파 레퍼런스의 변동에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

위의 내용과 같이 분산발전 기반의 계통연계형 인버터의 연

구가 많이 진행되었다. 하지만 고조파 보상을 위한 멀티루프 전류제어기의 설계가 정확하게 이루어지지 않아서 실제 시스템에 적용하는데 어려움이 존재한다.

이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 계통연계형 인버터에서 계통전류의 고조파를 보상하기 위한 제어기 설계 알고리즘을 제안한다.

### 2. 본론

#### 2.1 고조파 보상을 위한 제어기 설계

기존의 제어기는 단일루프 제어를 많이 사용하였다. 하지만 제어기가 레퍼런스 추종 이외에 시스템 동특성이나 안정성을 고려할 때 단일루프 제어방식 보다 멀티루프 제어 방식을 많이 사용한다 [2]. 멀티루프 제어는 외부루프와 내부루프로 나눌 수 있다. 외부루프는 실제 레퍼런스값을 추종하도록 동작하게 된다. 예를들면 독립운전모드에서는 지역적 부하에 전력을 공급하기 위해서 전압제어를 하게 된다. 이 경우 전압제어기는 외부루프로 동작하고 필터에 흐르는 전류를 내부루프로 제어하게 된다. 반대로 계통연계모드에서는 계통측 전류를 제어하기 때문에 외부루프로 전류를 제어하고 내부루프로 PoC전압이나 캐패시터 전압을 제어하게 된다. 본 논문에서는 계통연계형 인버터로 동작하기 때문에 내부 전압제어기를 포함하는 외부 전류제어기 형태의 멀티루프 제어기를 사용한다. 내부 전압제어기는 다시 내부 전류제어기로 구성되어 있다. 전체 제어기는 내부 전류제어기, 내부 전압제어기, 외부 전류제어기로 구성되어 있고 각각의 제어기 특성을 확인하고 고조파 보상을 위한 제어기를 추가함으로써 최종적인 제어기 설계가 이루어진다. 그림 1은 멀티루프 제어기를 포함하는 계통연계형 인버터를 나타낸다.

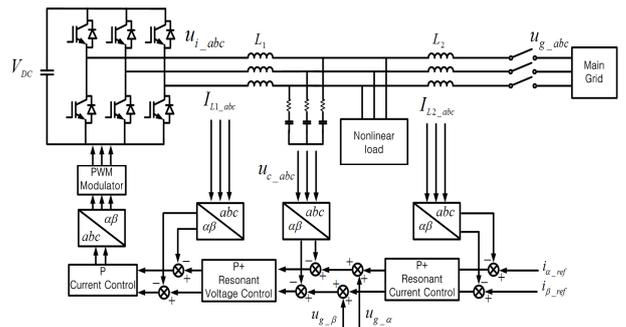


그림 1. 멀티루프 제어기를 포함하는 계통연계형 인버터.

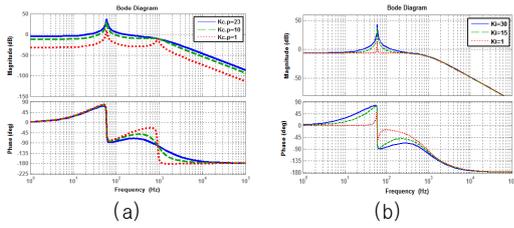


그림 2. 게인값의 변화에 따른 제어기 특성 : (a)  $K_{c,p}$  변화에 따른 전압제어기 전달함수 보데선도, (b)  $K_i$  변화에 따른 전압제어기 전달함수 보데선도.

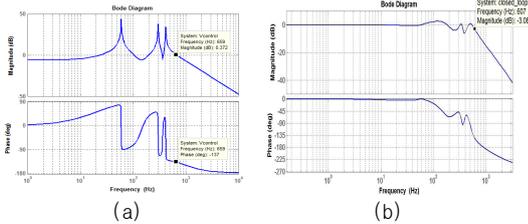


그림 3. 제어기 전달함수 보데선도 : (a) 내부 전압제어기 개루프 보데선도, (b) 외부 전류제어기 폐루프 보데선도.

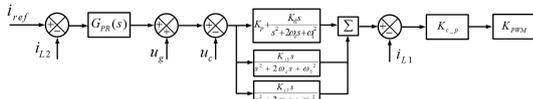


그림 4. 고조파 보상 제어기가 포함된 전체 제어기 블록 다이어그램

## 2.2 내부 전류제어기 설계

내부 전류제어기는  $L_1$ 에 흐르는 전류와 레퍼런스 전류와의 관계로써 나타 낼 수 있다. LC 필터 전달함수를 포함하는 내부 전류제어기의 전달함수는 식 (1)로 표현할 수 있다. 식(1)에 대한 근계적을 확인해 보면  $K_{c,p}$ 가 약 23 일 때 시스템 공진이 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

$$\frac{i_{L_1}(s)}{i_{L_1,ref}(s)} = \frac{K_{c,p}Cs}{LCs^2 + K_{c,p}Cs + 1} \quad (1)$$

## 2.3 내부 전압제어기 설계

내부 전압제어기는 PR제어기 기반으로 구성하였다. 2.2장에서 구했던 전류제어기를 포함하는 전압제어기는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$G_v(s) = \left( K_p + \frac{K_i s}{s^2 + 2\omega_s + \omega_h^2} \right) \left( \frac{K_{c,p}Cs}{LCs^2 + K_{c,p}Cs + 1} \right) \left( \frac{1}{sC} \right) \quad (2)$$

식(2)를 통해서  $K_i$ 와  $K_p$ 를 구할 수 있다. 본 논문에서 근계적을 확인하였을 때  $K_p$ 는 약 0.025,  $K_i$ 는 약 23이 되는 것을 확인하였다. 게인값의 변화에 따른 제어기 특성을 확인하기 위해 그림 2처럼 변수를 바꿔가며 게인값과 위상여유등을 확인하였다.

## 2.4 외부 전류제어기 설계

외부 전류제어기는 앞서 구했던 제어기를 모두 포함하는 형태로 식 (3)처럼 나타낸다.

$$G_i(s) = \left( K_p + \frac{K_i s}{s^2 + 2\omega_s + \omega_h^2} \right) \left( \frac{G_v(s)}{1 + G_v(s)} \right) \left( \frac{1}{sL_2} \right) \quad (3)$$

그림 3으로 제어기 대역폭과 위상여유를 확인하고 그 값을 만족시키는 게인값을 선정하였다. 그림 4는 고조파 보상 제어기가 포함된 전체 제어기 블록 다이어그램을 나타내었다.

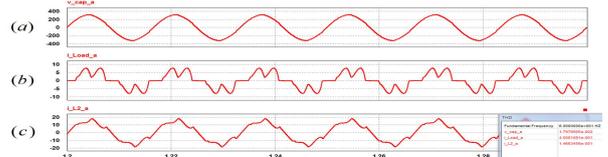


그림 5. 고조파 보상 전 전압 및 전류 파형 : (a) 캐패시터 전압, (b) 부하 전류, (c) 계통 전류.

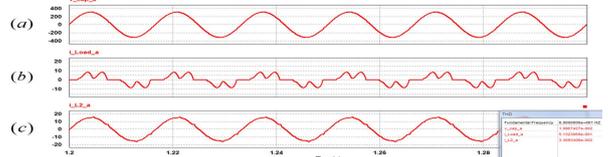


그림 6. 고조파 보상 후 전압 및 전류 파형 : (a) 캐패시터 전압, (b) 부하 전류, (c) 계통 전류.

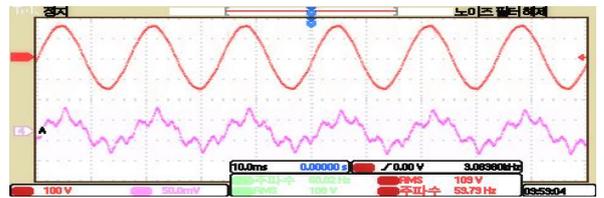


그림 7. 고조파 보상 전 캐패시터 전압 및 계통 전류.

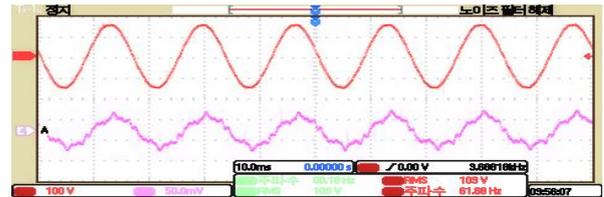


그림 8 고조파 보상 후 캐패시터 전압 및 계통 전류.

## 3. 시뮬레이션 및 실험

그림 5는 고조파 보상이 포함되지 않은 상태이다. 계통전류 THD가 14%로 왜곡된 상태이지만 그림 6에서처럼 고조파 보상이 포함 된 후 계통전류 THD는 3%로 향상되었다. 그림 7과 그림 8은 실험에 대한 결과이다. 그림 7은 고조파 보상이 포함 되지 않은 캐패시터 전압과 계통전류 파형이다. 그림 8은 고조파 보상 후 파형을 나타내는데 계통전류 THD가 21%에서 9%로 많이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 계통연계 인버터에서 비선형부하 연결시 발생하는 고조파를 보상하는 방식을 제시하였다. 시스템 특성 및 안정성을 고려하여 각각의 제어기를 설계하고 고조파 보상이 포함된 전체 멀티루프 제어기 설계 알고리즘을 제안하였다. 제안된 제어기를 가지는 계통연계형 인버터의 고조파 보상 기능은 시뮬레이션 및 실험을 통해 입증하였다.

## 참고 문헌

- [1] J. He, Y. W. Li, F. Blaabjerg, and X. Wang, "Active harmonic filtering using current controlled, grid connected DG units with closed loop power control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, pp. 642-653, 2014.
- [2] Kyungbae Lim, Jaeho Choi, Juyoung Jang, Sangho Moon, and Jaesig Kim, "Output voltage regulation based on P plus resonant control in islanded mode of microgrids," *In Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International*, pp. 365-370, 2014.