

# P+공진 제어를 활용한 인버터 출력 전압 제어 방식 연구

임경배<sup>1</sup>, 최재호<sup>1</sup>, 장주영<sup>2</sup>, 문상호<sup>2</sup>, 김재식<sup>2</sup>  
충북대학교<sup>1</sup>, 포스코에너지<sup>2</sup>

## Inverter Output Voltage Regulation based on P+Resonant Control

Kyungbae Lim<sup>1</sup>, Jaeho Choi<sup>1</sup>, Juyoung Jang<sup>2</sup>, Sangho Moon<sup>2</sup>, Jaesig Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

### ABSTRACT

본 논문은 LCL 필터를 가진 계통연계형 인버터 기반 마이크로그리드가 독립 운전 모드에서 동작할때의 인버터 출력 전압 제어 방식에 대해 다루고 있다. 분산 전원 기반의 마이크로그리드가 독립 운전 모드로 전환될 경우 마이크로그리드는 분산 전원만으로 전체 지역적 부하를 담당해야 하는 의무를 지니게 된다. 따라서 이때 마이크로그리드는 전압원으로 가정되며 이를 위해 전압 제어가 수행되어야 하며 담당하고 있는 부하가 불평형 또는 비선형 부하 일 경우 역상차, 영상차, 특정 차수의 고조파가 발생되기 때문에 기존의 전압 제어 방식을 사용할 경우 출력 전압에 높은 THD가 발생하게 되며 이는 부하의 성능을 저해하는 요소로 작용한다. 따라서 본 논문에서는 기존의 PI 제어기 대신 특정 주파수에서 높은 제어 제인을 갖게하는 P+ 다중 공진제어기를 선정하였으며 이를 특정 고조파 별로 다중으로 제어함으로써 비선형-불평형 부하 연결에 의한 악영향에 대처하고자 하였다. P+ 다중 공진제어에 의한 출력 전압 THD 개선 효과는 PSIM Simulation 을 통해 검증되었으며 기존의 PI, Advanced PI 제어기와 그 성능이 비교 분석되었다.

### 1. 서론

태양광, 풍력, 연료 전지등의 신재생 에너지를 기반으로 하는 분산발전을 통합한 요소인 마이크로그리드는 유동성있고 신뢰할 만한 전력 공급이 가능하다는 측면에서 최근 각광받고 있으며 이때 각각의 에너지원들은 인버터를 통해 계통과 연결된다. 계통 연계 모드시 마이크로그리드는 계통에 대하여 보조 전력원으로 동작하게 되며 이러한 이유로 계통 연계형 인버터는 전류 제어를 수행함과 동시에 계통 연계 운전의 제한된 전류 고조파 범위내에서 전력을 공급할 의무를 지니게 된다. 이때 인버터와 계통 사이에 L 또는 LCL 필터를 설치함으로써 전류 고조파와 리플 경감이 가능하다. 이러한 필터를 가진 인버터 독립 운전 모드에서의 전압 제어는 아래와 같은 내제하는 단점들을 지니게 된다.

첫 번째는 전압 제어시 필터성분으로 인해 출력 임피던스가 None-zero 의 특성을 가지기 때문에 빠르고 강인한 전압 제어가 필요되어진다는 것이고 두번째는 출력단에 비선형 또는 불평형 부하 연결 시

부하측에서 발생하는 고조파와 불평형 요소로 인해 매끄러운 출력 전압의 제어가 쉽지 않다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 요소들에 기인한 출력 전압 THD 성능 저하에 대한 대책으로서 고정자 좌표계에서의 P+다중 공진 제어기<sup>[1,2]</sup> 활용하여 빠른 동특성을 갖게 함과 동시에 고조파와 전압 불평형 문제를 해결하고자 하였으며 이를 동기 좌표계에서의 PI 제어가 기반이 된 고조파, 불평형 보상 기법과 비교함으로써 그 이점에 대해 분석하고자 하였다. 제안된 방식은 PSIM Simulation 을 통해 검증되었다.

### 2. 전압 제어기 설계

3 상에서의 PI 제어기 기반의 기존 전압 제어 방식은 동기좌표계의 dq 축 변수를 활용하게 된다. 기존 PI 제어기의 전달함수는 아래와 같다.

$$K_p + \frac{K_i}{s} \quad C_{PI}(s) = \quad (1)$$

dq 프레임에서의 PI 제어는 평형 3 상 시스템하에서 정현파 신호를 제어하기 위한 좋은 해결책으로서 간주되어왔다. 그러나 위 방식은 분산발전 시스템의 전형적인 특징으로 여겨지는 불평형 또는 비선형 왜곡 전류에 의해 야기되는 전압 왜곡에 대한 해결책으로는 적절치 않다. 따라서 [3]에서는 독립 운전 모드의 전압 제어 시스템에 불평형, 비선형 부하가 연결되었을 때 PI 제어를 사용하여 발생하는 고조파를 보상하는 기법을 제안하고 있다. 하지만 위 방식은 보상하고자 하는 고조파 성분에 대해 정상차와 역상차로 분리하여 각각 제어기를 추가해야 하고 natural 프레임과 dq 프레임 사이의 변환을 위해 고조파 보상 제어와 비례하는 수의 디지털 필터와 비선형 불평형 부하에 의해 왜곡된 출력 전압에 대한 정확한 위상 정보가 필요되어진다는 한계점을 지닌다. 따라서 본 논문에서는 P+R 제어기를 사용함으로써 위에 언급된 전압 고조파 보상 방식에 대해 개선될 수 있음을 보이고자 하였다. 논문에서 분석하고 있는 불평형 및 비선형 부하 연결시 발생하는 전압 불평형 및 고조파 보상을 위한 P+R 제어기는 아래와 같다.

$$C_{PR} = K_P + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} + \sum_{h=3,5,7th} K_{ih} \frac{s}{s^2 + \omega_h^2} \quad (2)$$

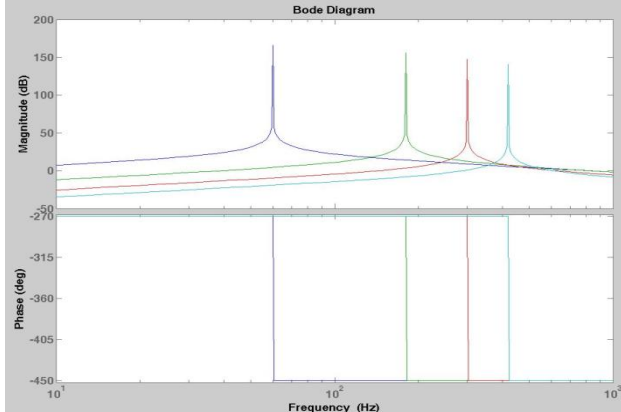


그림 1. P+ 다중 공진 제어기의 개루프 보데 선도

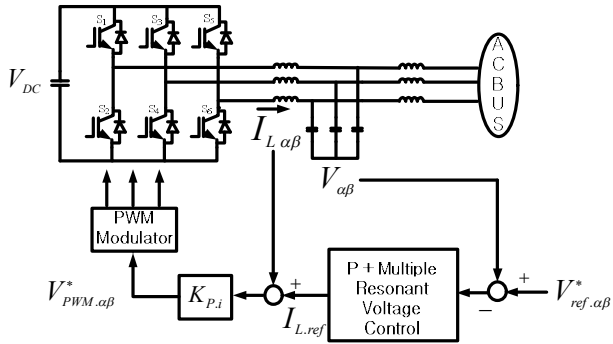


그림 2. 전체 제어 방식

그림 1 은 식 (2)의 공진항 각각에 대한 보데 선도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 불평형 부하에 대비하여 역상차, 영상차와  $6n \pm 1$  차, 즉 기본 주파수  $\omega_0$  뿐만 아니라 보상 고조파 주파수  $3\omega_0, 5\omega_0, 7\omega_0$ 에 대한 공진항에 대한 고려도 추가 되어 1, 3, 5, 7 차 주파수 영역에서 제어기의 게인이 매우 큰 값을 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 PI 제어가 고조파 보상을 위해 정상차와 역상차의 신호를 따로 제어해주어야 하는 반면 식 (2)와 같은 방식의 P+R 제어는 하나의 제어기로 특정 고조파 주파수에 해당하는 정상차와 역상차의 신호를 동시에 제어 가능하다는 장점을 가진다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서의 제어기는 그림 2 와 같이 정상 상태 에러를 줄이기 위한 외부 전압 루프와 시스템 동특성 향상을 위해 추가된 비례 계인을 가진 내부 전류 루프로 구성되었다.

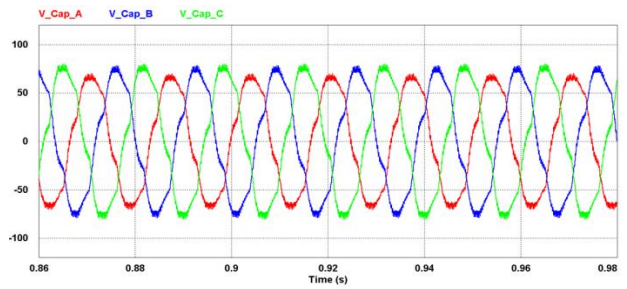
### 3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터

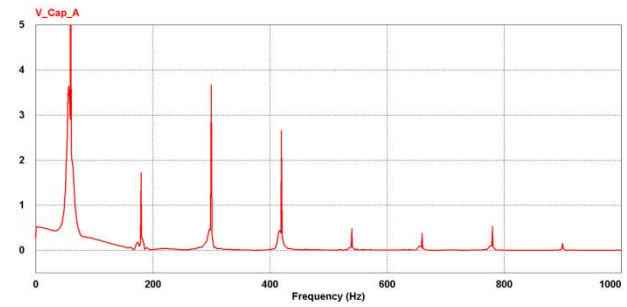
Parameters	Value	Unit
Rated active power	100	kW
DC link voltage	750	V
Rated output voltage	90	V <sub>RMS</sub>
Filter capacitor, $C_f$	15	uF
Inverter side inductor, $L_i$	2700	uH
Grid side inductor, $L_g$	2700	uH
PI control gain	1, 500	None
PI control gain(harmonic ctrl)	0.5, 0.01	None

PR control gain	P gain	0.01	None
	Resonant gain (1st)	5000	None
	Resonant gain (3rd)	4000	None
	Resonant gain (5th)	2500	None
	Resonant gain (7th)	2000	None

그림 2 와 Table 1 은 각각 전체 제어 방식과 시뮬레이션의 시스템 파라미터를 보여준다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 총 3 개의 제어기의 불평형-비선형 부하에 대한 성능을 비교해보고자 한다. 스위칭 주파수는 4kHz 이고 샘플링 타임은 8 kHz 로 선정되었다. 제안된 방식은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증되었다.



(a)

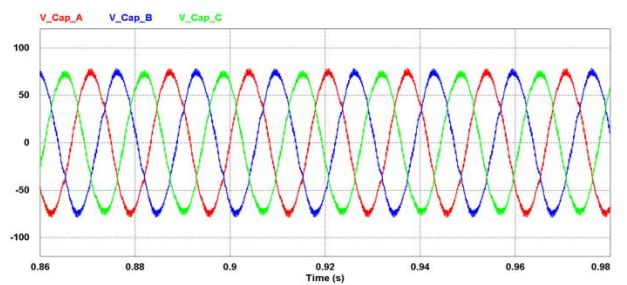


(b)

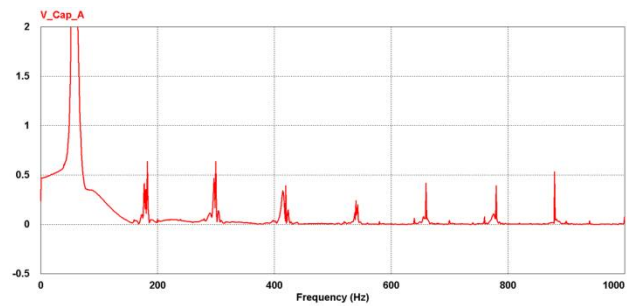
그림 3 비선형-불평형 부하 연결시 기존 PI 제어 성능:

(a) 출력전압,

(b) A 상 출력전압 FFT



(a)



(b)

그림 4 비선형-불평형 부하 연결시 고조파 보상 기법을 가진

PI 제어 성능:

- (a) 출력전압,
- (b) A 상 출력전압 FFT

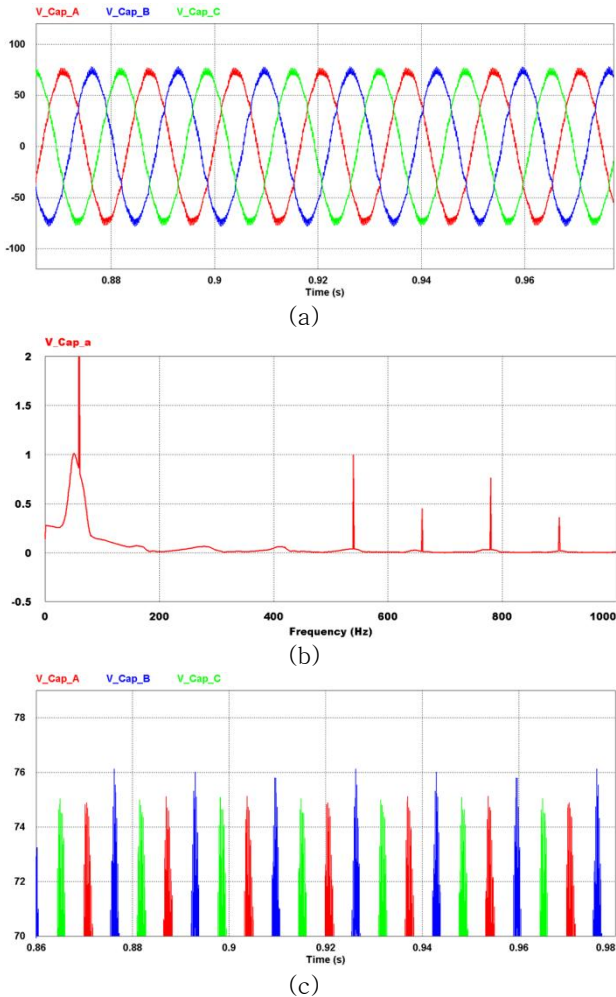


그림 5. 비선형-불평형 부하 연결시 P+ 다중 공진 제어기 제어 성능:

- (a) 출력전압,
- (b) A 상 출력전압 FFT
- (c) 확대된 출력전압

표 2 세가지 제어기의 전압 THD 및 평형 개선 성능 분석

Parameters	Voltage THD (A phase)	Unbalance (peak to peak)
Conventional PI control	9.1 %	≈ 11.5 V
PI control with harmonic compensation	4.2 %	≈ 1.8 V
P + multiple resonant control	3.9 %	≈ 1 V

그림 3 은 기존의 PI 제어 기반의 시스템에 불평형 비선형 부하가 연결되었을때의 출력 전압 파형과 A 상의 전압 THD 를 보여준다. 그림 3 의 (a)에서 보여지듯 출력 전압은 고조파 보상 방식을 적용하지 않았기 때문에 상마다 피크치에서 magnitude 값의 큰 차이를 보였고 또한 (b)에서 보여지듯 THD 가 9.1%

정도로 왜곡되었다.

그림 4 는 위의 방식에서 정상차, 역상차 팀의 독립적 제어를 통한 고조파 보상기법이 적용되었을때의 파형을 보여준다. 그림 3 의 (a)와 비교하여 그림 4 의 (a)파형은 각 상의 출력 전압들이 피크치에서 거의 차이를 보이지 않고 불평형이 보상된 것을 알 수 있다. 또한 그림 4 의 (b)에서 확인할 수 있듯이 그림 3 의 (b)와 비교하여 3 차, 5 차, 7 차 고조파가 대폭 감소되었다.

마지막으로 그림 5 는 P+다중 공진 제어가 적용되었을때를 보여주고 있다. 그림 5 (a)에서 나타난 각 상의 출력 전압들은 그림 4 의 (a)와 마찬가지로 피크치에서 거의 전압 차이를 보이지 않고 있다. 또한 출력전압 A 상의 fft 를 나타내는(b)에서 볼 수 있듯이 그림 4 의 (b)와 마찬가지로 3 차, 5 차, 7 차 고조파가 대폭 개선된 것을 확인가능하다. (c)는 이때의 불평형 정도를 보기위한 확대된 전압파형을 보여준다. Table 2 는 수행된 시뮬레이션들의 결과를 종합하고 있다. 위 표에서 확인할 수 있듯 기존의 PI 제어기만으로는 불평형, 비선형 부하에 대한 THD 와 불평형 개선 품질을 보증할 수 없기 때문에 이에 대한 성능 개선을 위해 고조파 보상이 추가된 PI 제어기와 P+다중 공진 제어기의 적용이 필요되어진다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 마이크로그리드 인버터가 독립 운전 모드시 전압 제어를 수행할때의 전압 제어 방식에 대해 분석하였다. 독립 운전 모드에서 부하단에 불평형-비선형 부하가 연결될 경우 역상차, 영상차,  $6n \pm 1$  차 고조파가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 각각 기존 PI 제어, 고조파 보상 기법이 추가된 PI 제어, P+다중 공진 제어에 대한 시뮬레이션이 수행되었고 결과적으로 P+다중 공진 제어가 보다 단순화된 제어기 디자인에도 불구하고 보상 기법이 추가된 PI 제어와 거의 비슷한 성능을 보이고 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] D. N. Zmood, D. G. Holmes, and G. H. Bode, "Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters with Zero Steady-State Error," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 814-822, 2003.

[2] Dipankar De and Venkataramanan Ramanarayanan, "A Proportional + Multiresonant Controller for Three-Phase Four-Wire High-Frequency Link Inverter," *IEEE Trnas. Power Electron.*, vol.25,no.4.2010

[3] Kyung-Hwan Kim, Dong-Seok Hyun, "Advanced synchronous feference frame controller for three-phase UPS powering unbalanced and nonlinear Loads," *KIPE Trans.*, vol. 10, no. 5, pp. 508-517,2005.

[4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed

power generation system," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.  
53, No. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.