

고조파 보상을 위한 전압 매그니튜드 회복 기능을 가진 비례공진 제어 기반의 출력 전압 제어기 설계

임경배, 신찬호, 최재호,
충북대학교

PR based Output Voltage Controller Design with Voltage Magnitude Restoration Technique for Harmonic Compensation

Kyungbae Lim¹, Chanho Sin¹, Jaeho Choi¹

¹ School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

ABSTRACT

본 논문은 독립 운전 모드에서 전압 고조파 보상을 위한 비례 다중 공진 제어 기반의 전압 제어에 대해 다루고 있다. 독립 운전 모드에서 인버터는 계통과의 연계 없이 전체 지역적 부하의 수요를 담당해야 하기 때문에 전압원으로서 정의된다. 그런데 이때 부하가 불평형 또는 비선형 부하인 경우 역상차, 영상차 또는 특정 고조파 전류가 발생하며 이로 인해 출력 전압이 왜곡된다. 본 논문에서는 앞서 언급한대로 전압 고조파 보상을 위해 흔히 사용되는 비례적분 제어기 대신 고조파 보상 제어의 단순화를 위해 비례 공진 제어기를 사용하였다. 하지만 이와 같은 비례 공진 제어를 실용적인 형태로 추가될 경우 전압 매그니튜드 추종에러가 발생하게 되므로 본 논문에서는 추가적으로 실용적인 비례 공진 제어기가 갖는 단점을 극복하고자 비례 적분 기반의 간단한 전압 회복 기법에 대해 제안하며 제안된 제어 방식은 PSiM 시뮬레이션과 실험을 통해 입증되었다.

1. 서론

독립 운전 모드에서의 인버터 전압제어는 다양한 분산발전을 통합한 요소인 마이크로그리드의 지역적인 특성과 계통사고 시 지역적 부하에 유동성 있고 신뢰할 만한 전력 공급에 대한 요구가 점차 증대됨에 따라 최근 큰 이슈로 부각되고 있다. 계통 연계 모드 시 마이크로그리드는 계통에 대하여 보조 전력원으로서 동작하며 이러한 이유로 계통연계형 인버터는 전류 제어를 수행함과 동시에 계통 연계 운전의 제한된 전류 고조파 범위 내에서 전력을 공급할 의무를 지니게 된다. 이때 인버터와 계통 사이에 L 또는 LCL 필터를 설치함으로써 전류 고조파와 리플 경감이 가능하다. 하지만 계통 사고 발생시나 전략적으로 독립 운전이 필요할 시 기존의 L 또는 LCL 필터를 가지는 계통 연계형 인버터는 계통과 차단됨에 따라 전압원으로서 동작될 필요성을 가진다. 이러한 출력 필터를 가진 인버터 독립 운전 모드에서의 전압 제어에서는 필터성분으로 인해 출력 임피던스가 None-zero의 특성을 가지기 때문에 빠르고 강인한 전압 제어가 필요되어지며 출력단에 비선형 또는 불평형 부하 연결 시 부하측에서 발생하는 고조파와 불평형 요소로 인해

매끄러운 출력 전압 제어가 쉽지 않게 된다. 따라서 [1,2]는 비례공진 제어기를 활용하여 외부 출력 전압 제어루프와 내부 전류 제어 루프로 구성되며 추가적으로 고조파 보상 제어루프를 추가하여 독립 운전 모드시 비선형 부하 연결에 의한 전압 왜곡에 대처하였다. 하지만 이때 이러한 비례 공진 제어기는 갑작스러운 시스템 파라미터 변동등의 문제로 인한 주파수 변화에 민감한 특성을 가진다. 이러한 문제를 해결하고자 [3]에서는 이상적인 비례공진 제어기에 저역 통과 필터가 추가된 실용적인 형태의 비례 공진 제어기를 제안하였다. 그러나 이러한 실용적인 비례 공진 제어기는 시스템 주파수 변화에 보다 강인한 반면 중심 주파수에서의 게인을 낮추는 단점을 동시에 가지기 때문에 따라서 제어값이 지령치의 매그니튜드를 정확히 추종하지 못하게 된다. 이런 이유로 본 논문에서는 기존의 고조파 보상을 위한 실용적 비례공진 제어기 기반의 전압 제어에 비례 적분 제어기 기반의 전압 매그니튜드 회복 기법을 추가하여 앞에 언급한 문제를 해결하고자 한다. 제안된 기법을 포함한 고조파 보상 제어는 각각 PSiM 시뮬레이션과 실험을 통해 입증되었다.

2. 제어기 설계

앞서 언급한 것처럼 본 논문에서는 불평형 비선형 지역부하로 인한 고조파 발생에 대처하고자 비례 다중 공진 전압 제어기를 사용하였으며 이는 식 (1) 과 같다.

$$C_{PR} = K_P + \sum_{h=1,3,5,7th} K_{ih} \frac{s}{s^2 + 2\omega_{cut} s + \omega_h^2} \quad (1)$$

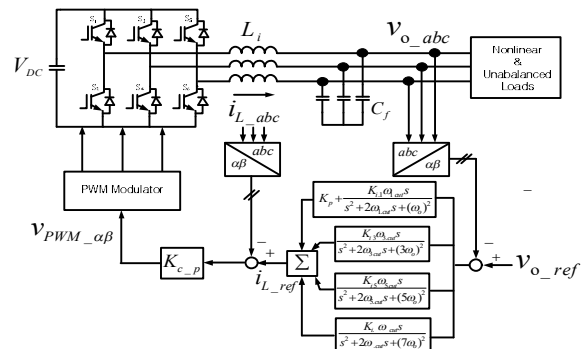


그림 1. P+ 다중공진제어기를 활용한 인버터 출력 전압 전체 제어 방식

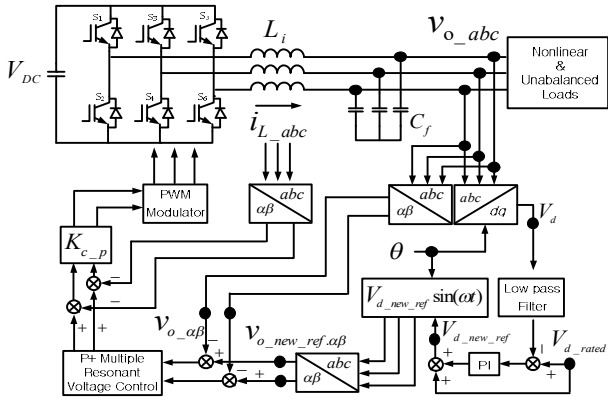


그림 2. 전압 회복 기법이 추가된 전체 전압 제어 방식

그림 1 은 P+다중 공진 제어기를 활용한 인버터 출력 전압 전체 제어 방식을 보여준다. 3 차 고조파 보상법은 그림상에서는 불평형 보상을 위해 추가되었으나 커패시터와 변압기가 델타형일 경우 충분히 상쇄되므로 생략 가능하다. 앞서 언급한 것처럼 그림 1 의 비례 공진 제어기는 저역 통과 필터의 형태가 추가된 실용적인 형태로 주파수 변화에 보다 강인하지만 전압 매그니튜드 추종 성능을 저하시킨다. 따라서 본 논문에서는 그림 2 와 같이 지령, 측정 전압 각각의 d 축성분을 검출하고 이 오차를 비례 적분 제어기를 사용하여 지령 전압에 재투입 함으로써 실제 전압이 지령 전압 매그니튜드를 잘 추종할 수 있게 하였다. 따라서 제안된 기법을 기반으로 비례 적분 기반의 고조파 보상제어보다 더 간단하게 고조파 보상을 실현함과 동시에 전압 매그니튜드 추종 성능도 향상 가능해졌다.

3. 실험 및 시뮬레이션

이번 장에서는 독립 운전 모드와 계통 연계모드에서의 고조파 보상효과를 검증하고자 각각 실험과 PSIM 시뮬레이션을 통해 제안된 방식을 검증하고자 하였다. 표 1 은 이때의 파라미터를 보여준다.

표 1. 실험 및 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value	Unit	
Rated active power	1	kW	
DC link voltage	400	V	
Rated output voltage	73.5	V	
Switching frequency	5	kHz	
Filter capacitor, C_f	40(Y)	μ F	
Inverter side inductor, L_i	4	mH	
PR control gain	P gain(K_p), P gain($K_c p$)	0.0354, 16	Ω^{-1}, Ω
	Resonant gain (1st)	30	Ω^{-1}
	Resonant gain (3th)	80	Ω^{-1}
	Resonant gain (5,7th)	80	Ω^{-1}
	Cut-off Frequency ($\omega_{1,3,5,7,cut}$)	4, 12, 20, 28	rad/s

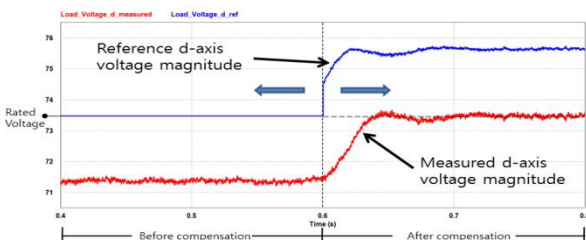


그림 3. 전압 회복 기법 추가 전후의 시뮬레이션 결과

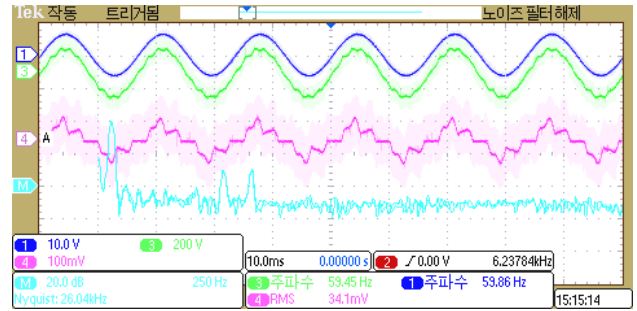
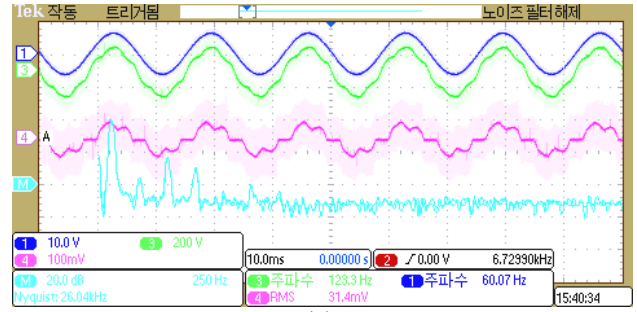


그림 4. a 상에 대한 실험 결과 (위부터 지령전압, 실제 전압, 부하전류, 전압 FFT)

(a)고조파 보상 제어 적용 전 (b)고조파 보상 제어 적용 시

그림 3 은 제안된 전압 회복 기법 추가 전후의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 보여지듯, 전압 회복 기법 추가 전에는 실용적인 비례 공진 제어 특성으로 인해 실제 전압이 지령 전압을 잘 추종하지 못하고 있으나 추가 후에 실제 값이 지령치를 잘 추종함을 확인 가능하다.

그림 4 는 제안된 전체 제어 방식을 활용한 a 상의 실험 결과를 보여준다. 그림에서 보여지듯, 고조파 보상 제어 전과 후의 전압 파형의 왜곡 정도가 차이를 보임을 알 수 있으며 이 때의 전압 THD 는 약 9.1%에서 4.3%로 개선되었다.

4. 결론

본 논문은 비례 공진 제어기 기반의 고조파 보상기법에 대해 다루고 있으며 실용적인 비례 공진 제어기법이 가지는 단점에 대해 분석하고 이를 해결하고 비례 적분 기반의 전압회복 기법을 추가하였다. 제안된 방식을 사용하여 비례 적분 기반의 고조파 보상제어보다 더 간단히 구현이 가능함과 동시에 지령 전압 매그니튜드 추종성능도 향상될 수 있음을 실험과 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Dipankar De and Venkataramanan Ramanarayanan, "A proportional + multi resonant controller for three-phase four-wire high-frequency link inverter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 899-906, 2010.
- [2] Dipankar De and Venkataramanan Ramanarayanan, "Decentralized parallel operation of inverters sharing unbalanced and nonlinear loads," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3015-3025, 2010.
- [3] 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 Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 814-822, 2003.