

계통연계형 인버터를 위한 비례다중공진제어 기반의 캐스케이드 전류-전압 제어기 설계

임경배, 김동환, 최재호
충북대학교

P+ Multi Resonant Control based Cascaded Current-Voltage Controller Design for Grid-Connected Inverter

Kyungbae Lim, Donghwan Kim, Jaeho Choi

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

ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터를 위한 비례공진제어 기반의 캐스케이드 전류-전압 제어기 설계에 대해 다루고 있다. 인버터가 계통연계모드로 동작할 때 인버터는 계통의 보조 전력원으로서의 역할을 하기 때문에 전류원으로 정의된다. 이때 LCL 필터가 연결된 계통연계형 인버터의 출력 LC 단에 비선형 지역적 부하가 연결될 경우 기존의 단일 전류 제어기만으로는 비선형 부하로 인한 고조파 왜곡에 대처하기 힘들고 독립운전모드와의 모드전환시 매끄러운 과도 특성을 보장하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 비례다중공진제어기를 활용한 내부 출력 전압, 외부 출력 전류 루프로 구성된 캐스케이드 전류-전압 제어기를 제안하였고 제안된 방식이 고조파 보상과 모드 전환시의 매끄러운 과도 특성에 효력을 보임을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

계통 연계형 인버터의 계통연계모드에서의 전류 제어와 독립운전모드에서의 전압제어는 다양한 분산발전을 통합한 요소인 마이크로그리드의 지역적인 특성과 계통사고시 지역적 부하에 유동성있고 신뢰할 만한 전력 공급에 대한 요구가 점차 증대됨에 따라 최근 큰 이슈로 부각되고 있다. 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 부하 연결시 부하측에서 발생하는 고조파로 인해 매끄러운 출력 전압 제어가 쉽지 않게 된다^[1].

또한 이러한 비선형 부하가 연결된 인버터가 전류제어를 필요로 하는 계통연계모드로 동작할 때에는 비선형 부하로 인한 출력 필터 커패시터단의 전압왜곡에 기인하여 계통으로 유입되는 출력 전류 역시 기본적인 단일루프의 기본과 전류제어기만을 사용하면 크게 왜곡되는 경향을 보인다. 추가적으로 이러한 계통연계모드에서의 기본과 전류제어기가 독립운전모드로 모드 전환될 때 각 모드에서 서로 다른 제어기를 사용하고 있기 때문에 모드 전환시의 안정적인 과도 특성 역시 보장할 수 없게된다.

따라서 본 논문에서는 비선형부하가 연결된 인버터

시스템의 독립운전시와 계통연계모드 각각의 전압-전류 고조파 보상을 통한 매끄러운 출력 전압 제어를 실현함과 동시에 독립운전시와 계통연계모드 상호간의 모드전환시 과도특성을 개선하고자 계통연계모드와 독립운전모드에서 사용 가능한 비례공진제어기 기반의 캐스케이드 출력전류-전압 제어기^[2] 제안하고 PSIM simulation tool 을 통해 제안된 방식이 비선형부하를 가진 계통연계형 인버터 시스템의 계통 연계모드와 독립운전모드의 출력전류, 출력전압 고조파 보상에 효력을 가지는 동시에 매끄럽고 안정적인 과도 모드 전환 특성을 보임을 입증하였다.

2. 제어기 설계

앞서 언급한 것처럼 본 논문에서는 계통연계모드와 독립운전모드에서 사용가능한 비례 공진 제어기 기반의 캐스케이드 전류-전압 제어기를 제안하였으며 이때의 비례공진 및 비례 다중 공진 제어기와 전체 제어 방식은 각각 식 (1) 과 그림 1 과 같다.

$$G_{PR} = K_p + \sum_{h=1st \text{ or } 1,5,7th} K_{ih} \frac{s}{s^2 + 2\omega_{cut}s + \omega_h^2} \quad (1)$$

그림 1 은 P+ 공진 제어기를 활용한 인버터 출력 전압 전체 제어 방식을 보여준다. 식 1 에서 3 차 고조파 보상項은 불평형 보상을 위해 추가되어야 하지만 커패시터와 변압기가 델타형일 경우 충분히 상쇄되므로 생략 가능하다. 앞서 언급한 것처럼 본 논문에서는 비선형 부하가 연결된 계통연계형 인버터의 모드전환시

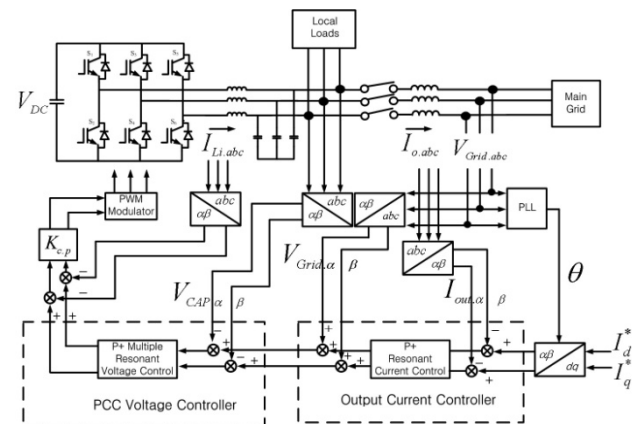


그림 1. 제안된 P+ 다중 공진 제어기를 활용한 캐스케이드

전류-전압 제어기 전체 제어방식

매끄럽고 안정적인 과도특성과 비선형 부하로 인한 출력 전압과 전류의 왜곡 보상을 위해 P+ 다중 공진 제어를 활용한 캐스케이드 전류-전압 제어기를 제안한다. 제안된 방식은 인버터측 내부전류를 피드백으로 받는 내부 비례 제어기를 포함한 비례다중 공진 제어 기반의 출력 전압 제어기와 기본과 출력 전류만을 제어하는 외부 출력 전류 제어기로 구성된다. 계통 전압은 제어기가 계통 전압의 변화에 즉각적으로 대응하기 위해 전향 보상되었으며 전류의 지령값을 0 으로 설정하고 스위치를 개방함으로써 위의 제어기는 독립 운전 모드로서 동작되며 이때 모드 전환에도 불구하고 같은 제어기의 사용하고 있기 때문에 매끄럽고 안정적인 모드 전환 역시 가능해진다.

3. 시뮬레이션

이번 장에서는 제안된 방식의 독립 운전 모드와 계통연계모드에서의 고조파 보상효과 및 모드전환시의 안정적인 과도 특성을 PSIM 시뮬레이션을 검증하고자 하였다. 표 1 은 이때의 시뮬레이션 파라미터를 보여준다.

표 1. 캐스케이드 전류-전압 제어기시뮬레이션 파라미터

Parameters		Value	Unit
Output power	Grid-connected mode	4000	W
	Islanded mode	1000	W
Filter inductor(Li,Lg)		2, 1	mH
Filter capacitor		15	uH
PCC voltage		380	Vrms
Output filter capacitor voltage		220	Vrms
Switching frequency		5	kHz
Sampling frequency		10	kHz
Cascaded Current-Voltage Controller	Current P gain		Ω
	Current resonant gain (1st)		Ω
	Current resonant gain (5th)		Ω
	Current resonant gain (7th)		Ω
	Voltage P gain		1/ Ω
	Voltage resonant gain (1st)		1/ Ω
	Cut-off Freq ($\omega_{1,5,7,cut}$)		rad/s
Inner Current P gain			Ω

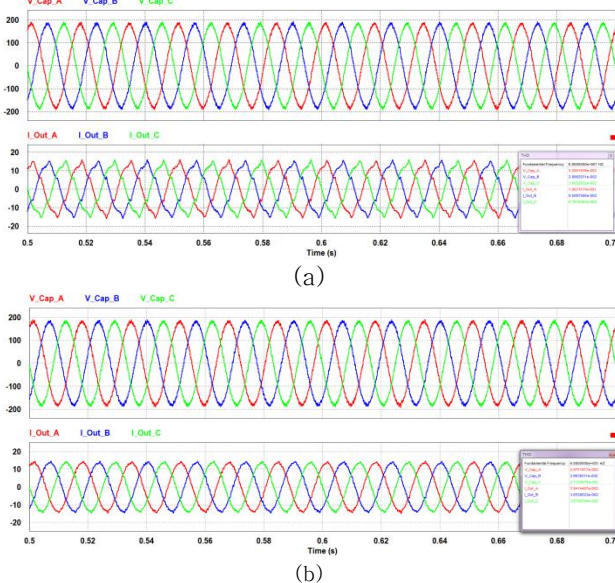


그림 2. 계통연계모드시 출력전압, 출력전류 시뮬레이션 결과 (a)기본과 제어시

(b)고조파 보상적용시

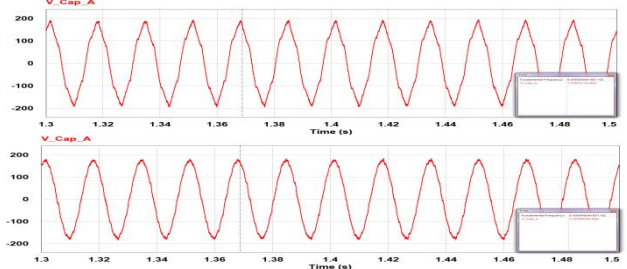


그림 3. 독립 운전 모드시 출력 전압 파형 (위)기본과제어시 (아래)고조파 보상 제어시

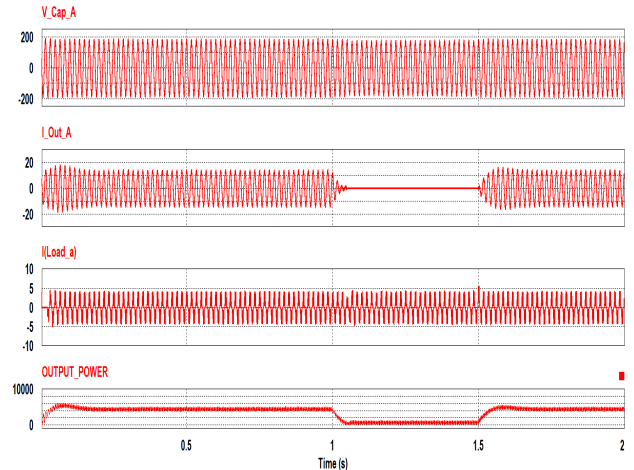


그림 4. 계통연계형 인버터의 모드 전환시 출력 전압, 전류, 부하전류, 출력 전력(계통연계→독립운전→ 계통연계)

표 2. 캐스케이드 전류-전압 제어기시뮬레이션 THD 결과

	계통연계모드		독립운전모드	
	전압	전류	전압	전류
THD (%)				
기본과제어	3.2%	2.8%	7.5%	
고조파보상	10%	3.9%	3.4%	

그림 2 와 3 은 각각 계통연계모드시와 독립운전모드시의 고조파 보상 유무에 따른 출력전압과 출력전류의 파형을 보여준다. 그림과 표 2 에서 확인가능하듯 기본과 만을 제어할때보다 고조파보상을 추가하였을 때 THD 성능이 개선됨을 알 수 있다. 그림 4 는 제안된 방식이 seamless 모드 전환 특성을 보임을 나타낸다.

4. 결론

본 논문은 비선형 지역부하 연결 시 캐스케이드 전류-전압 제어기 기반의 고조파 보상을 추가한 계통연계형 인버터 제어기 설계를 제안하였다. 제안된 이론은 고조파 보상성능은 물론 모드 전환시 매끄럽고 안정적인 과도동작을 가능하게 함을 입증하였다.

참고 문헌

[1] Kyungbae Lim, Juyoung Jang, Sangho Moon, Jaesig Kim and Jaeho Choi, "Output Voltage Regulation based on P Plus Resonant Control in Islanded mode of Microgrids," 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, ID. 129, 2014.
 [2] Tomas Hornik and Qing-Chang Zhong, "Power Quality in