

Droop 제어 기반 계통연계 병렬인버터의 끊김없는 모드전환기법

박성열, 강수한, 정호영, 최세완
서울과학기술대학교

A Seamless Mode Transfer Method of Droop Control based Grid-connected Parallel Inverters

Sungyoul Park, Soohan Kang, Hoyung Jeong, and Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

중요부하를 가지고 있는 계통연계 병렬인버터는 계통과의 연결이 끊길 경우 중요부하에 안정적인 전압공급을 위하여 끊김 없는 모드전환 동작이 요구된다. 기존 병렬인버터는 계통연계 시 전류제어모드 운전을 하고, 독립운전 시에는 전압제어모드 운전을 한다. 그래서 단독운전 발생 시 불안정한 전압을 부하에 공급하게 되고, 모드전환 시 제어기절체로 인해 인버터출력 전압에 심각한 과도상태를 발생시켜 중요부하에 큰 손상을 입힐 수 있다. 본 논문에서는 Droop 제어 기반 계통연계 병렬인버터의 끊김 없는 모드전환 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 1kW 시작품을 제작하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 분산발전시스템과 에너지저장시스템에 대한 관심이 증가하면서 마이크로그리드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그림 1은 부하 전력을 자체적으로 공급할 수 있는 마이크로그리드의 개념도이다. 마이크로그리드에서 분산전원, ESS용 인버터는 용량의 확장성, 시스템의 보수편리, 신뢰성 향상 등의 이유로 주로 모듈화 되어 진다. 그러나 모듈화 된 인버터는 모듈 간 특성 차이로 인해 순환 전류가 발생할 수 있기 때문에 전류 분담이 가능한 병렬 운전 제어기법이 요구된다. 기존의 병렬운전 제어기법은 Droop, Master-Slave, 집중식 제어방식이 있다. Droop 제어기법은 각 모듈간의 통신선이 없어도 부하분담이 가능하다. 그래서 감지잡음이나 상호 간섭문제가 없기 때문에 장소와 환경에 무관하게 설치가 가능한 장점이 있다. Master-Slave 제어기법은 부하분담 시 응답속도가 빠른 장점이 있지만 인버터 모듈간의 신호선이 필요하며 인버터 모듈간의 거리가 멀어 신호선이 길어질 경우 감지잡음이나 상호 간섭 문제가 발생하는 단점이 있다.^[1] 집중식 제어방식은 신호선의 문제가 있고 부하분담을 위해 별도의 중앙 제어기와 부하 전류를 센싱하기 때문에 용량의 확장성의 한계가 있다는 단점이 있다.^[2] 이러한 병렬 운전 제어 방식의 특성을 고려해보면, 모듈화 된 인버터에는 Droop제어 기법이 적합하다.

그림 2는 중요부하를 가지는 계통연계 병렬인버터의 회로도를 나타낸다. 계통연계 병렬인버터에서는 PCC에서 중요부하를 공유하고 있기 때문에 항상 안정적인 전력을 공급해야 한다. 그러나 계통이상 등으로 인해 Recloser가 차단되면 인버터가 이를 감지하지 못하고 부하에 지속적으로 전력을 공급하는 단

독운전 상황이 발생하게 되는데, 인버터는 이를 감지하여 계통과의 연결을 끊고 출력 전압을 제어하는 독립운전모드로 모드 전환하여 중요 부하에 안정적인 전력을 공급하여야 한다. 그러나 기존 제어기법은 단독운전 발생 시 단독운전을 검출하기 전인 clearing time동안에는 전류제어 운전을 유지하고 있기 때문에 인버터 출력전력과 부하조건에 따라서 전압이 크게 변동할 수 있어서 불안정한 전압을 중요부하에 공급할 수 있다. 또한, 단독운전 검출 후 인버터의 운전모드를 독립운전으로 전환 시 제어기절체로 인해 과도상태가 발생할 수 있어 중요부하에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 단독운전 검출 전 뿐만 아니라 모드 전환 시에도 부하전압의 과도현상을 최소화하는 모드 전환기법이 필수적이다.

본 논문에서는 clearing time과 모드 전환 시 중요부하에 안정적인 전압 공급과 각 인버터간의 정확한 전류 분담이 가능하게 하는 Droop제어 기반의 간접전류 제어기법을 제안한다. 1kW시작품을 통해 제안한 방법이 유효한지 검증하였다.

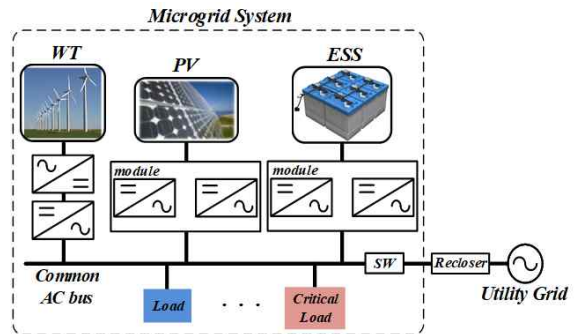


그림 1 마이크로그리드 시스템

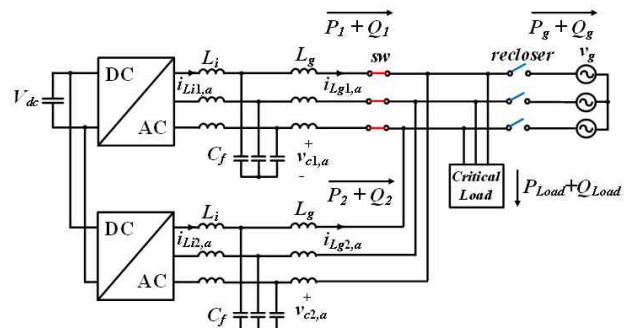


그림 2 중요부하를 갖는 계통연계 병렬인버터

2. 제안하는 모드전환 기법

그림 3은 제안하는 Droop 제어기반 계통연계 병렬인버터의 병렬운전 제어블록도이다. 제안한 제어방법은 계통연계와 독립운전 모두 공통으로 더블 루프로 구성된 전압 제어기를 사용한다. 내부 루프는 인버터 측 인덕터 전류제어기, 외부 루프는 출력 캐패시터 전압제어기로 구성되어 있다. 동기좌표변환을 이용하여 3상의 정지좌표계 전압·전류를 2상 동기좌표계로 바꾸어 제어를 하며 전압·전류 제어기는 비례적분 보상기를 이용한다. S와 G는 각각 독립운전과 계통연계 모드를 나타내며 운전 모드에 따라서 전환된다. 계통연계 시에는 간접전류 제어블록에 의해서 계산되어진 전압 지령치에 의해서 출력전류를 간접적으로 제어하며, 독립운전 시에는 Droop제어블록에 의해서 만들어진 전압 지령치에 의해서 부하분담 제어를 하게 된다. 인버터는 독립운전 모드에서 부하분담을 위하여 Droop 제어를 한다. 그래서 제안한 제어방법은 계통연계와 독립운전 모두 동일한 제어기를 사용함으로써 모드전환 시 제어기절체로 인한 과도상태를 발생시키지 않으며, 단독운전을 검출하기 전인 clearing time동안에도 정상동작 범위 내에서 전압제어를 해주기 때문에 중요부하에 항상 안정적인 전압을 공급할 수 있다. 간접전류제어는 출력전류를 만들어 주기 위한 캐패시터 전압을 제어하여 간접적으로 출력전류를 제어하는 방법이다.^[3] 그림 4는 간접전류제어의 동작원리를 나타낸다. 계통 측 LCL필터의 계통 측 인덕턴스(L_g)를 이용하여 출력 전류를 만들어 주기 위한 인덕터 전압(V_{Lg})을 계산할 수 있고, 최종적으로 캐패시터 전압 지령치를 구할 수 있다. 간접전류제어 출력전류의 지령치는 제어하고자 하는 유효·무효전력 P^*, Q^* 를 수식 (1)과 (2)를 이용하여 전류 지령치(i_{Lg}^{dq})를 계산한다.

$$i_{Lg,d}^* = \frac{2}{3} \frac{(P^* V_{g,d} + Q^* V_{g,q})}{(V_{g,d})^2 + (V_{g,q})^2} \quad (1)$$

$$i_{Lg,q}^* = \frac{2}{3} \frac{(P^* V_{g,q} - Q^* V_{g,d})}{(V_{g,d})^2 + (V_{g,q})^2} \quad (2)$$

간접전류제어는 수식(3)과 (4)를 이용하여 계산한 캐패시터 전압($v_{Cf,nom}^{dq}$)에 전류 제어기 보상 값을 더한 값이 캐패시터 전압 지령치(v_{Cf}^{dq})가 된다.

$$v_{C,d}^* = |V_g| \quad (3)$$

$$v_{C,q}^* = |v_{Lg}| = i_{Lg,d}^* \times \omega L_g \quad (4)$$

최종적으로 인버터는 간접적으로 캐패시터 전압을 제어함으로써 원하는 출력 전류를 제어하게 된다. 단독운전 발생 시에는 PLL과 전압지령치에 리미터로 인해서 출력 전압이 정상동작 범위를 벗어나지 못하도록 제어한다. 그리고 단독운전 검출 후 독립운전으로 모드전환을 해준다.

독립운전 시 그림 5의 Droop 제어 특성 곡선을 이용하여 부하분담 제어를 하게 된다. 전압 지령치는 수식 (5)와 (6)를 이용하여 각 모듈의 출력 유효, 무효전력에 기반하여 전압 지령치크기와 주파수 지령치를 만든다.

$$v_{Cf,peak}^* = V_{nom} - nQ \quad (5)$$

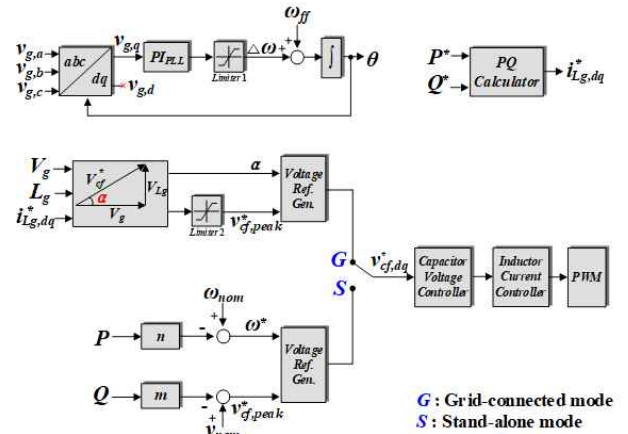


그림 3 제안하는 병렬인버터의 모드전환 기법

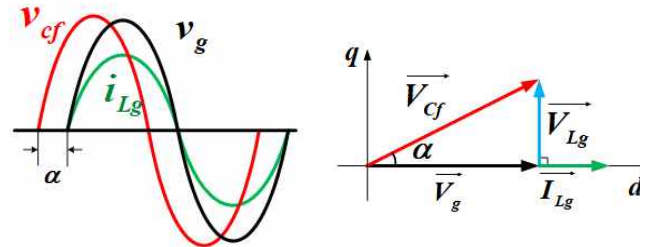


그림 4 간접전류 제어기법의 동작원리

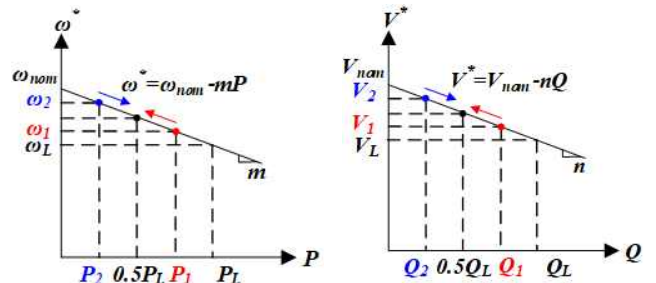


그림 5 Droop 제어 특성 곡선

$$\omega^* = \omega_{nom} - mP \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에 의해서 만들어진 값을 2상 동기좌표계로 변환하여 캐패시터 전압지령치를 만들어 주게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 표1과 같은 사양을 갖는 3kW 3상 인버터 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6과 7은 RL부하를 가질 때 각 인버터가 유효전력을 부하보다 크게 출력하는 경우와 작게 출력하는 경우를 모의실험 한 것이다. 계통연계 중 임의의 시간에 재폐로 차단기(recloser)를 개방하여 정전을 모사하였고, 100ms 후 계통 차단기를 개방하였다. Clearing time동안에 전압이 정상동작 범위 내에서 동작하며, 모드전환 시에도 과도상태 없이 전환되는 것을 확인할 수 있

표 1 시스템 사양

P	3kW	V_g	220V	f_g	60Hz
L_i	1.68mH	C_f	3μF	L_g	3mH

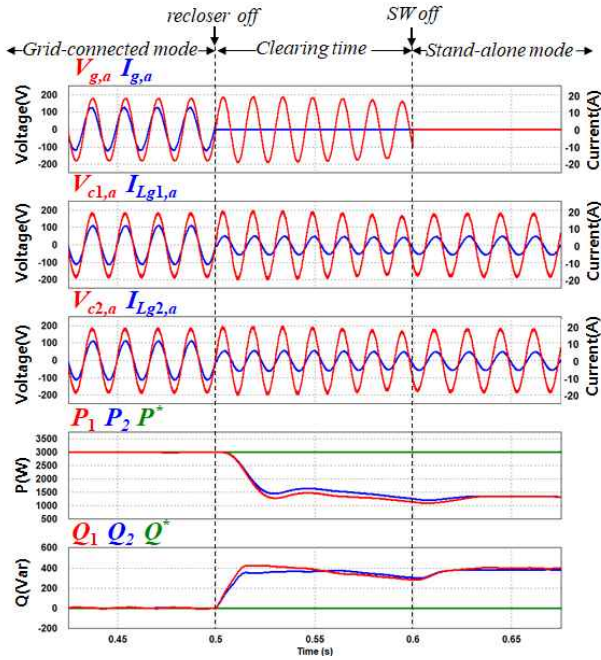


그림 6 병렬인버터 모드전환 시뮬레이션 파형 I

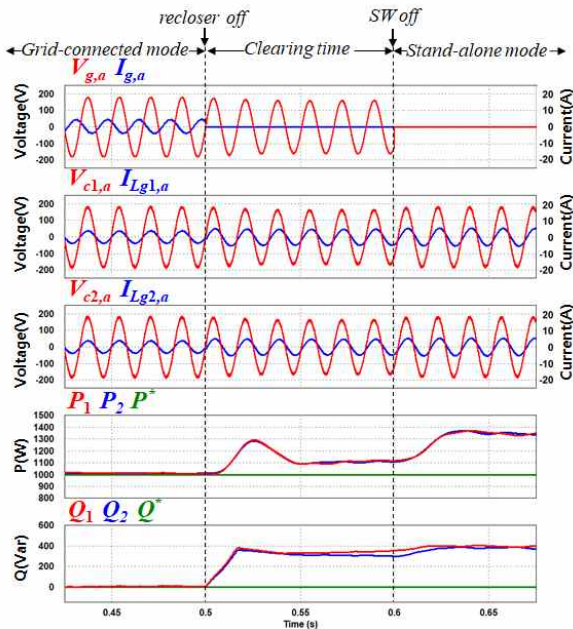


그림 7 병렬인버터 모드전환 시뮬레이션 파형 II

다. 또한 계통연계 전력제어와 독립운전 시 부하분담이 되는 것을 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 표1과 같은 사양을 갖는 1kW 3상 인버터 시작품이 사용되었다. 모의실험 조건과 동일하게 단독운전 상황을 모사하였으며, 저항부하 조건에서 실험을 진행하였다. 그림 8은 병렬인버터의 계통연계운전 실험파형으로 출력 전력제어가 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 인버터 1대의 모드전환 실험파형이다. 단독운전을 인지하지 못한 clearing time 동안에도 정상동작 범위 내에서 전압제어가 되며, 독립운전 모드로 전환 시(SW OFF)에도 과도상태 없이 전환되는 것을 확인할 수 있다.

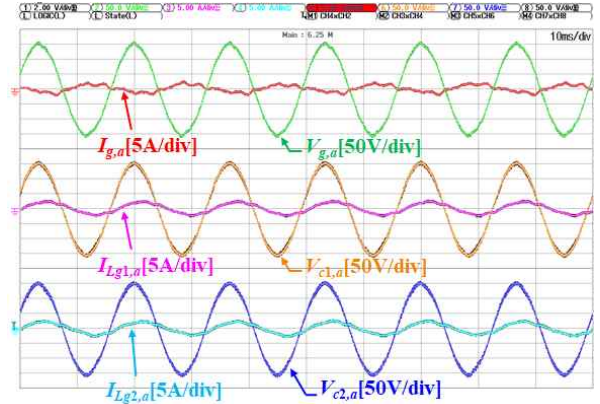


그림 8 병렬 인버터 계통연계 운전 실험 파형

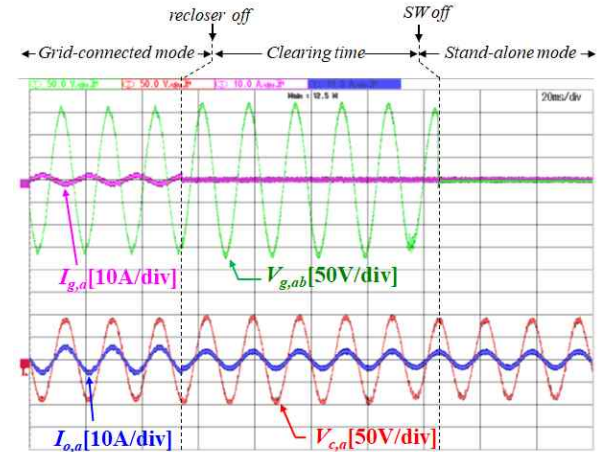


그림 9 인버터 모드전환 실험 파형

5. 결론

본 논문에서는 중요부하를 가지는 계통연계 병렬인버터에 적합한 Droop 제어 기반 모드전환기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 독립운전 시 병렬 인버터 간의 정확한 부하 분담이 가능하게 하며, clearing time과 모드 전환 시에도 중요부하에 안정적인 전압을 공급할 수 있다. PSIM을 이용한 모의 실험과 1kW급 축소시작품을 통한 실험 결과로 본 논문의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Y. Pei, G. Jiang, X. Yang, Zhaoan Wang, "Aut o-Master-Slave Control Technique of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems and UPS", *IEEE Conference*, pp 2050-2053, 2004
- [2] Tan, K.T, Peng, X.Y., So, P.L, Chu, Y.C, Chen, M.Z.Q, "Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol 3, no 4, pp1977-1987, Dec, 2012
- [3] S. Yoon, H. Oh, S. Choi, "Controller Design and Implementation of Indirect Current Control Based Utility-Interactive Inverter System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 1, pp26-30, Jan. 2013