https://doi.org/10.6113/TKPE.2019.24.5.349

마이크로그리드에서 계통연계 인버터의 자율적이며 끊김없는 모드전환 기법

박성열[1], 권민호[2], 최세완†

A Seamless and Autonomous Mode Transfer Method of Grid-connected Inverter in Microgrid

Sung-Youl Park[1], Min-Ho Kwon[2], and Se-Wan Choi†

Abstract

A grid-connected inverter with critical loads should be able to supply a stable voltage to critical loads at mode change and during clearing time while detecting unintentional islanding. This study proposes a mode transfer method for a grid-connected inverter with critical loads. The proposed method, which integrates the grid-connected and islanded mode control loops into one control block, provides an autonomous and seamless mode transfer from the current control to the voltage control. Therefore, the proposed scheme can supply a stable voltage to critical loads at mode change and during clearing time. Experimental results are provided to validate the proposed method.

Key words: Grid-connected inverter system, Grid faults, Islanding mode, Seamless mode transfer, Critical load

1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 수요증가 및 화석자원 고갈 위기로 태양광, 풍력 연료전지 등의 분산발전시스템과 에너지저장시스템에 대한 관심이 증가하면서 소규모 전력망인 마이크로그리드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]-[2]. 그림 1은 마이크로그리드 시스템의 개념도이다. 마이크로그리드는 태양광, 풍력 등의 신재생에너지와 에너지저장시스템, 계통연계 인버터로 구성되어져 있으며 상위 계통이 끊기더라도 자체적으로 부하에 전력 공급이 가능하다[3]. 그림 2는 중요부하를 가지는 3상 계통연계 형 인버터의 회로도이다. 마이크로그리드에서 계통연계 인버터는 AC버스에 위치해 있으며 계통으로부터의 유, 출입 전력을 제어하고 부하에 전력을 공급한다. 이때 계통 고장으로 인한 단독운전이 발생하면 인버터를 계통과 분리하여야 한다. 그러나 그림 3의 파형과 같이 계통사고로 recloser가 ON되고 인버터가 이를 감지하지 못한 clearing time동안 출력 전력과 부하 조건에 따라서 부하 전압이 정상동작 범위를 벗어날 수 있으며 또한 독립운전으로 모드전환 시 제어기절체로 인한 과도상태가 크게 발생하여 중요부하와 인버터에 큰 손상을 일으킬 수 있다. 그래서 계통연계 인버터에는 계통고장으로 계통과의 연결이 끊겼을 경우에도 끊김없이 중요부하에 안정적인 전압을 공급할 수 있는 모드전환기법이 요구된다.

기존 계통연계 인버터의 모드전환 기법으로는 독립운전과 계통연계운전을 하나의 제어기로 통합한 방법이 있다[4]-[7]. 이 기법들은 동일한 제어기로 독립운전과 계통연계운전이 모두 가능해서 모드전환 시 제어기 절체로 인한 과도상태가 발생되지 않는다. 그러나 인버터가 단독운전을 검출하지 못한 clearing time동안에는 제어기의 출력이 포화되며 부하 전압이 정상동작 범위를 벗어날 수 있는 문제점이 있다. 이러한 clearing time동안 발생하는 과도상태 문제점을 보완한 방법으로 간접전류제어 기법이 있다[8]-[16]. 이 기법은 계통연계 모드에서 캐패시터 전압의 위상과 크기를 제어하여 간접적으로

Paper number: TKPE-2019-24-5-6
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology
Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866
[1] Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology
[2] Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)
Manuscript received Mar. 17, 2019; accepted Apr. 25, 2019
— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수추천논문임
— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

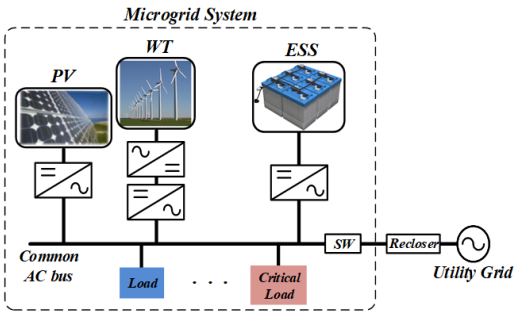

Fig. 1. Micro grid system.

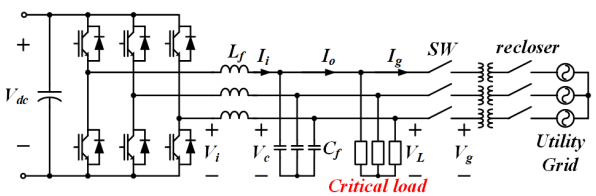

Fig. 2. Grid connected inverter with critical load.

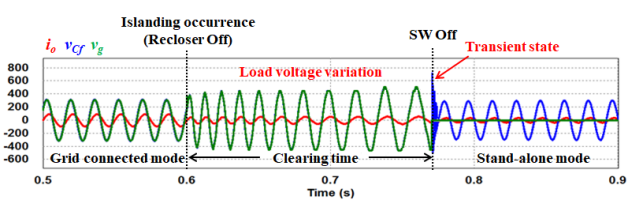

Fig. 3. Transient state when the grid fault occurs.

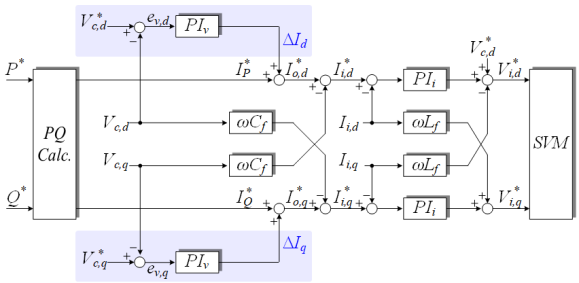

Fig. 4. Proposed mode transfer algorithm under an ideal conditions where a capacitor voltage reference equal to the grid voltage.

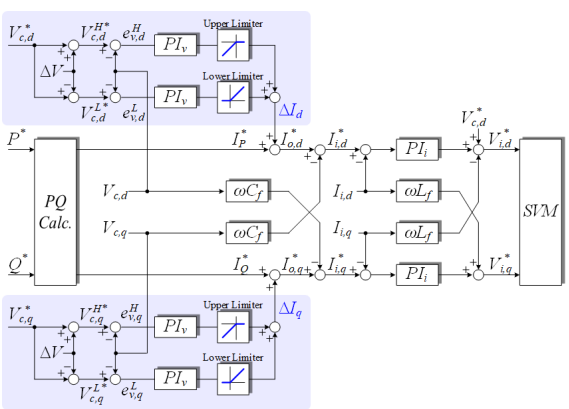

Fig. 5. Proposed mode transfer algorithm for the practical case.

출력전류제어를 제어하는 기법이다. 그래서 계통사고 시 급작스러운 모드전환이 요구되더라도 캐패시터 전압제어기는 동작모드에 상관없이 항상 동작하기 때문에 끊김 없는 모드전환을 성취할 수 있으며 clearing time 동안에도 안정적인 전압 공급이 가능하다. 그러나 간접전류 제어기법은 기본적으로 LCL필터에 한정된 제어 알고리즘으로 LC필터를 사용하는 시스템에서는 적용할 수 없는 한계가 있다. 또한, LCL필터의 인버터측 전류가 아닌 계통 측 전류를 제어하기 때문에 전류제어기의 차수가 높아 제어기의 대역폭을 넓게 설계하기 어렵다. 즉, 빠른 응답속도를 요구하는 응용에 적합하지 않다. 이외에도 독립운전을 위한 전압제어기와 계통연계운전을 위한 전류제어기를 통합한 제어방법이 제안되었었지만 부하전류센서가 추가로 필요하다는 문제점이 있다[17].

본 논문에서는 단독운전 시 자율적이고 끊김없는 계통연계 인버터의 모드전환기법을 제안한다. 제안한 모드전환기법은 추가적인 센서가 필요하지 않고 인버터 측 인더터 전류제어 기반으로 출력필터 구조와 상관없이 적용 가능하다. 제안된 알고리즘은 1kW 시작품을 제작하여 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 모드전환 기법

기존 일반적인 계통연계 인버터의 제어방법은 계통연계 시 계통전류를 제어하는 전류제어 블록과 독립운전 시 출력전압을 제어하는 전압제어 블록으로 구성되어 있다. 그러나 이러한 제어방법은 단독운전 발생 시, 단독운전을 감지하지 못한 clearing time동안 전류제어 모드를 유지하고 있기 때문에 인버터 출력전력과 부하조건에 따라 캐패시터 전압이 정상동작범위를 벗어날 수 있으며 또한 단독운전 검출 후 독립운전으로 모드전환 시 제어기 절체로 인한 과도상태가 발생하여 인버터시스템과 중요부하에 손상을 입힐 수 있다.

이 논문에서는 계통연계 운전을 위한 전류제어 블록과 독립운전을 위한 캐패시터 전압제어 블록을 하나로 통합한 모드전환기법을 제안하였다. 제안한 방법은 계통연계 시에는 전압제어기가 비활성화 되어 있고 인덕터 전류제어 동작을 하고 단독운전 발생 시에는 자동으로 전압제어기가 활성화되면서 캐패시터 전압 제어를 하게 된다. 그래서 단독운전 발생 시 clearing time동안에도 캐패시터 전압은 항상 정상동작범위 내에서 제어가 되게 되며 모드전환 시에도 제어기 절체로 인한 과도상태도 발생하지 않는다. 그러므로 인버터는 계통사고 시에도 중요부하에 항상 안정적인 전압을 공급할 수 있다.

그림 4는 캐패시터 전압 지령치($V_{c,dq}^*$)와 계통전압($V_{g,dq}$) 이 같은 이상적인 상황에서의 제안하는 모드전환 기법 의 제어블록도이다. 내부루프에 인덕터 전류제어기를 공유하면서 외부 루프에 출력 전류 지령을 계산하는 계통연계 블록과 캐패시터 전압을 제어하는 독립 운전

블록을 하나로 통합한 구조이다. 계통연계모드 시 외부 루프에 있는 캐패시터 전압 제어기의 출력(ΔI_{dq})과 유,무효전력 지령치(P^*, Q^*)를 입력 받아 계산된 전류 지령치(I_{PQ}^*)를 더한 값이 전류 제어기의 지령치($I_{o,dq}^*$)가 된다. 이때 커패시터 전압 지령치를 계통전압과 정확하게 같은 값으로 선정한다면 외부 전압제어기의 오차($e_{v,dq}$)는 항상 0이 되므로 제어기 보상 값도 0으로 출력된다. 그래서 계통연계 중에는 외부루프에 있는 전압제어기는 동작에 영향을 주지 않고 전류제어기만 활성화되어서 계통연계 운전을 하게 된다. 단독운전 발생 시 캐패시터 전압 변동이 발생하면 캐패시터 전압제어기의 전압 오차($e_{v,dq}$)가 발생하면 보상 값(ΔI)을 출력하게 된다. 그래서 단독운전이 검출되지 않은 상황에서도 자동적으로 인덕터 전류제어기의 지령치가 변동되면서 캐패시터 전압이 제어되게 된다.

앞서 제안한 그림 4의 제어기는 이상적으로 캐패시터 전압 지령치가 계통전압과 정확히 동일할 때만 유효하다. 그래야만 계통연계 모드에서 전압 오차($e_{v,dq}$)가 0이 되고 전류 제어 지령치에 간섭이 없다. 하지만 실제 계통전압을 정확히 예측 하는 것은 매우 어려울뿐더러 계측할 때의 노이즈 및 미소 변동분으로 인해 전압 오차($e_{v,dq}$)를 0으로 만들기는 거의 불가능에 가까우며, 이 오차는 전압제어기를 거쳐 전류제어기에 외란으로 작용한다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 그림 5와 같이 외부 전압 제어루프를 변경하였다. 변경된 전압제어기는 리미터를 추가하여 계통연계 상황에서는 내부 인덕터 전류 제어기에 영향을 전혀 주지 않도록 구성하였으며 단독운전 시에 전압변동 상황에 맞게 각 제어기가 활성화되도록 구성하였다. 전압 지령치($V_{c,dq}^*$)는 계통전압의 공칭 전압으로 설정하며 실제 전압제어기의 지령치는 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_{c,d}^{H*} = V_{c,d}^{*} + \triangle V \\ V_{c,d}^{L*} = V_{c,d}^{*} - \triangle V \\ V_{c,q}^{H*} = V_{c,q}^{*} + \triangle V \\ V_{c,q}^{L*} = V_{c,q}^{*} - \triangle V \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $\triangle V$는 전압 제어 밴드이며 계통 전압의 허용 변동 범위(±10%) 안에서 설정한다. 계통연계 상황에서 캐패시터 전압은 항상 두 지령치 사이에 있게 때문에 DQ 높은 전압 제어기 (HVR : High Voltage Regulation)는 양의 값으로 포화되어 있고 낮은 전압 제어기(LVR : Low Voltage Regulation)는 음의 값으로 포화되어 있다. 각 전압제어루프 출력에는 상한 리미터와 하한 리미터가 구성되어 있으며 각 리미터의 제한 값은 0으로 설정한다. 따라서 계통연계 중에는 전압제어루프의 최종 출력(ΔI_d, ΔI_q)이 0이 되므로 전류제어 루프에는 전혀 영향을 주지 않게 된다. 단독운전이 발생 시에는 출력 캐패시터 전압 변동이 발생하면 그림 6와 같이 DQ 전압제어기의 높은 전압제어기(HVR)와 낮은 전압제어기(LVR)

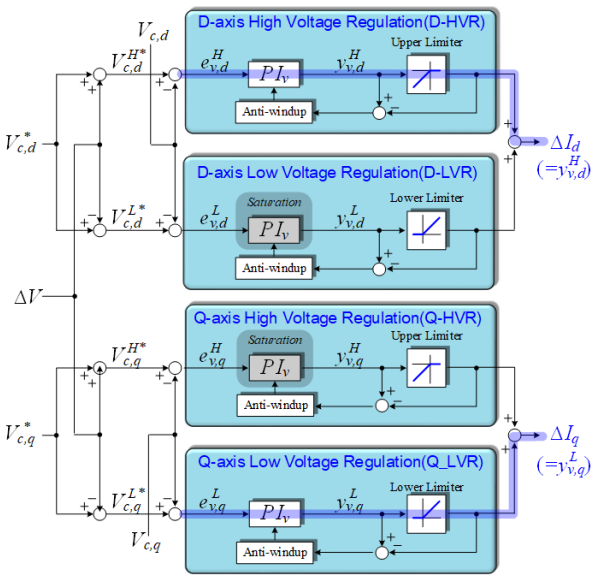

Fig. 6. Operation principle of the proposed outer voltage control loop when the grid fault occurs.

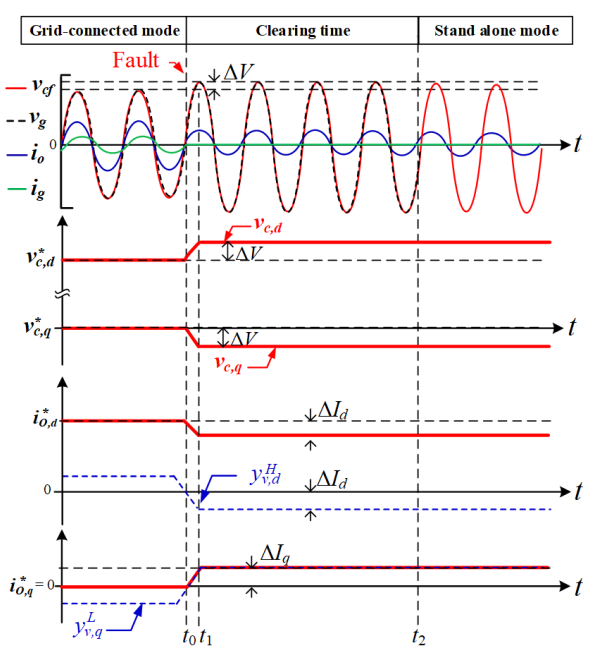

Fig. 7. Key wave form of the proposed method when the grid fault occurs.

중 하나가 활성화되고 나머지는 포화상태를 유지하며 제어를 하게 된다. 이때 활성화되는 전압 제어기는 단독운전 발생 직전의 계통전류에 의해서 결정된다. 그리고 계통연계 시 캐패시터 전압제어기가 비활성화 중일 때 오차의 누적으로 제어기가 과포화 되는 것을 방지하고 단독운전 시 전압 제어기가 빠르게 활성화되도록 하기 위해서 안티와인드업 기법이 반드시 필요하다.

그림 7은 그림 6과 같이 모드전환이 발생할 때 중요 파형을 나타낸 것이며 운전모드에 따른 동작원리는 다음과 같다.

TABLE I
SIMULATION SYSTEM SPECIFICATION

P	3kW	V_g	220V	f_g	60Hz
L_i	556μH	C_f	16μF	f_{sw}	10kHz

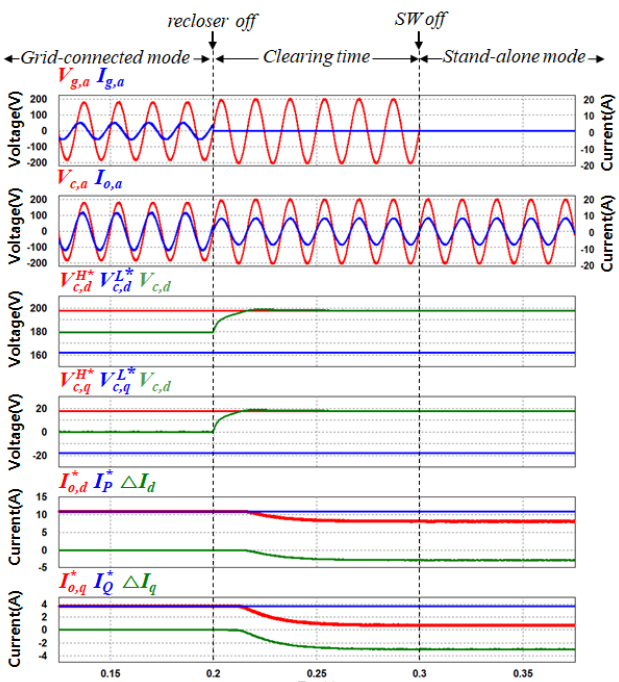

Fig. 8. Simulation waveforms showing mode transition when the grid connected, P=3W, Q=-1kvar, P_{Load}=2kW and Q_{Load}=0var.

Grid connected mode [~ t_0] : 인버터는 계통과 연계되어 중요부하 및 계통에 전력을 공급한다. 외부 전압제어 루프는 비활성화 되어 있어서 내부 전류 제어 루프에는 전혀 영향을 주지 않는다.

Clearing time [t_0 ~ t_2] : t_1에서 계통이상이 발생했을 때 계통에서 제어하는 Recloser가 열리고 인버터는 이를 판단하지 못하고 SW가 닫힌 상태인 clearing time 구간 이 발생한다. 이때 각 D축 높은 전압 제어기와 Q축 낮에는 D-HVR과 Q_LVR의 전압 오차가 감소되면서 전압제어기가 활성화되고 D, Q축 전압은 각각 기존 공칭 전압에 ΔV만큼 더하고 빼진 값으로 제어가 된다. 전압제어기 출력(ΔI_d, ΔI_q)이 전류 지령치($I_{o,d}^*$, $I_{o,q}^*$)에 더해져서 최종적으로 내부 루프의 전류 지령치는 부하 전류와 같게 된다. 그래서 단독운전 검출 전에도 자동적으로 캐패시터 전압을 제어하게 된다.

Stand alone mode [t_2 ~] : t_2에서 인버터는 단독운전을 감지하고 SW를 닫으며 인버터를 계통과 분리해준다. 이때 제어기 절체가 없기 때문에 과도상태는 발생하지 않는다.

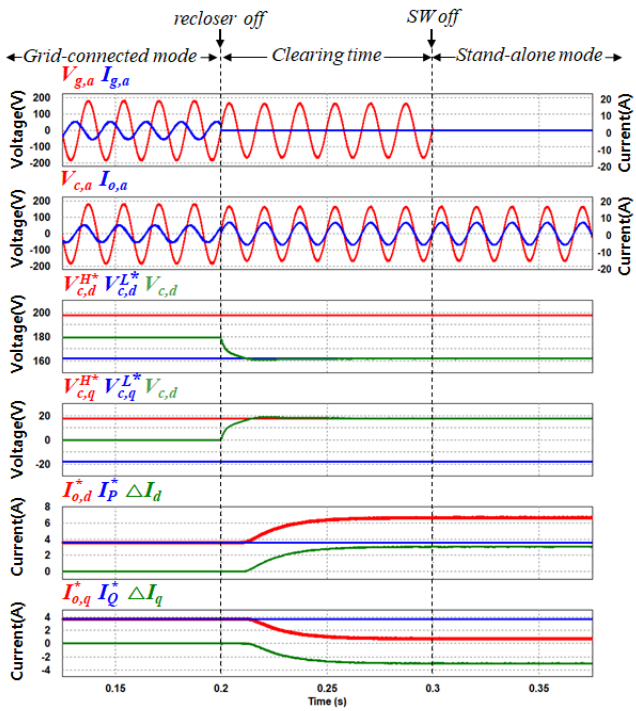

Fig. 9. Simulation waveforms showing mode transition when the grid connected, P=1kW, Q=-1kvar, P_{Load}=2kW and Q_{Load} = 0var.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘의 PSIM 모의실험을 위하여 표1의 사양을 갖는 3상 인버터를 사용하였다. 제안하는 알고리즘의 전압제어루프가 모든 출력 조건에서 동작하는 지 검증하기 위하여 저항조건에서 출력 전류 지령치를 모두 다르게 구성하여 모의실험을 진행하였다. 단독운전 시 그림 8은 D-HVR과 Q-HVR, 그림 9는 D-LVR과 Q-HVR, 그림 10은 D-LVR, Q-LVR 그리고 그림 11은 D-HVR, Q-LVR이 활성화되도록 출력 전력과 부하조건을 설정하였다. 계통연계 시 캐패시터 전압은 계통전압의 공칭전압과 같아서 두 지령치($V_{c,dq}^{H*}$, $V_{c,dq}^{L*}$)사이에 있게 된다. 그래서 캐패시터 전압제어기는 비활성화 되어 있게 되고 전압제어기 보상값 ΔI_d, ΔI_q는 0이 출력된다. 계통연계 시에는 유·무효전력 계산기에 의해서 만들어진 출력 전류 지령치(I_P^*, I_Q^*)로 인덕터 전류제어를 하게 되고 캐패시터 전압제어기는 전혀 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 단독운전 발생 시 recloser가 off 되면서 계통전류의 변동에 따라서 캐패시터 전압이 변동하게 된다. 각 DQ 캐패시시터 전압제어기는 높은 전압 제어기 루프와 낮은 전압 제어기 루프 중 하나가 자율적으로 활성화되고 ΔI_d, ΔI_q 보상값을 만들어 주는 것을 확인할 수 있다. 최종적인 인덕터 전류제어기의 지령치는 유·무효전력 출력 전류 지령치(I_P^*, I_Q^*)와 전압제어기 보상값(ΔI_d, ΔI_q)을 더한 값이 되게 되고, 내부 전류

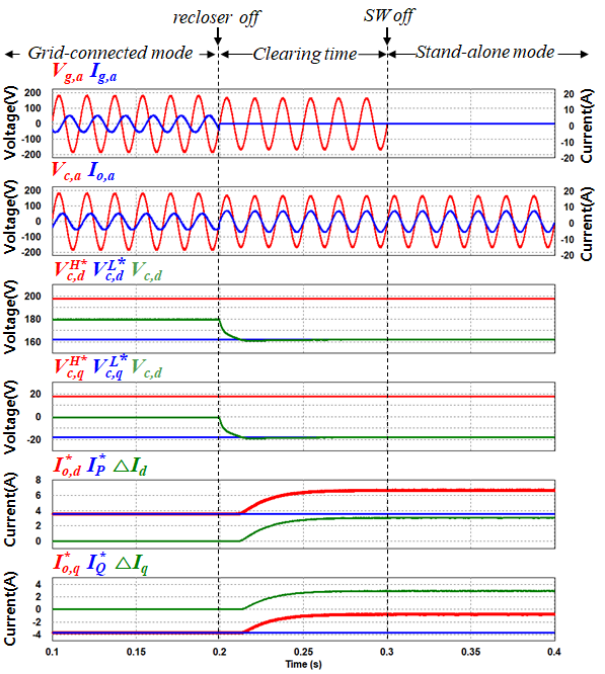

Fig. 10. Simulation waveforms showing mode transition when the grid connected, P=1kW, Q=1kvar, P_{Load}=2kW and Q_{Load} = 0var.

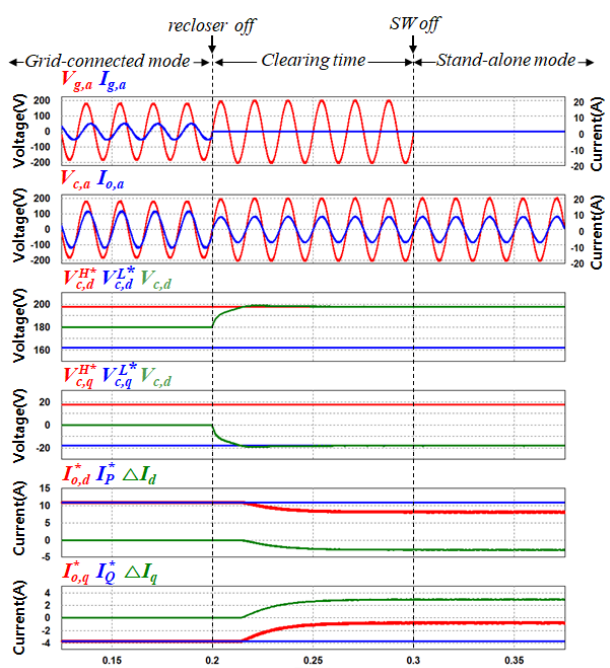

Fig. 11. Simulation waveforms showing mode transition when the grid connected, P=3kW, Q=1kvar, P_{Load}=2kW and Q_{Load}=0var.

제어기는 부하에 맞는 전류를 제어하게 된다. 그림 8~11에 보이는 것과 같이 단독운전 검출이 되지 않더라도 자율적으로 캐패시터 전압을 제어하는 것을 확인할 수 있다. 모드전환 시 과도상태도 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

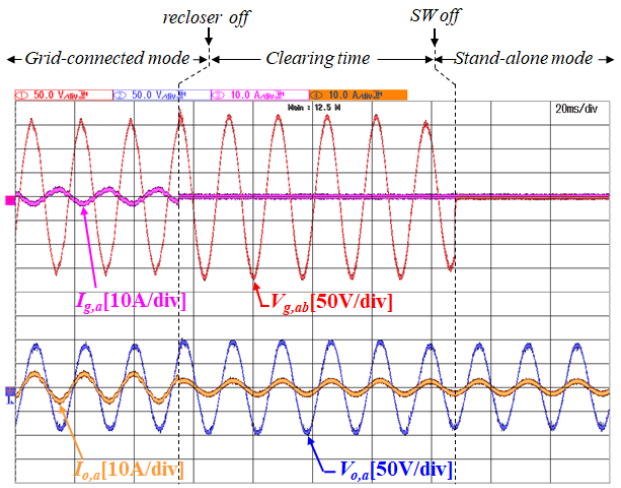

Fig. 12. Experiment waveforms showing mode transition when the grid connected, P=1kW, Q=−300var, P_{Load}=500W and Q_{Load}=0var.

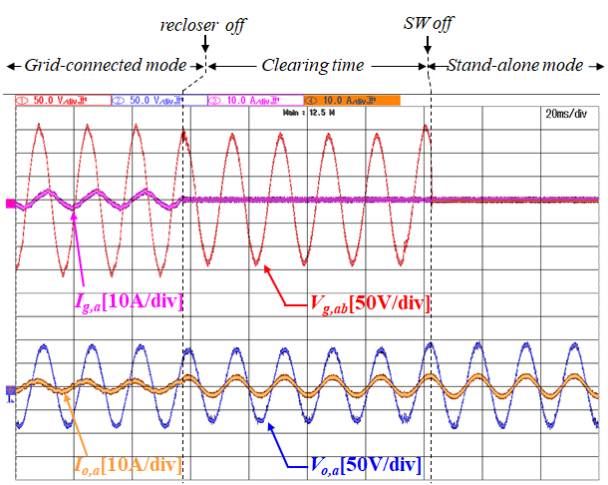

Fig. 13. Experiment waveforms showing mode transition when the grid connected, P=300W, Q=−300var, P_{Load}=600W and Q_{Load}=0var.

4. 실 험

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 표 2의 사양과 같은 1kW 3상 인버터 시작품이 사용되었다. 부하는 저항으로 구성되어 있으며 전압제어기의 4가지 동작모드를 검증하기 위하여 출력 전류지령치의 크기와 위상을 다르게 하였다. 계통연계 중 임의의 시간에 재폐로 차단기(recloser)를 개방하여 정전을 모사하였고, 본 실험에서 단독운전 검출 기능은 적용하지 않고 재폐로 차단기의 접점 신호를 받아 약 100ms 후 계통 차단기를 개방하였다.

그림 12~15 실험파형의 첫 번째 파형은 계통 전압과 전류를 보여주고 두번째 파형은 캐패시터 전압과 출력 전류를 보여준다. 계통연계 시에는 인버터는 계통전압과 출력전류의 역률을 1로 제어를 한다. 이때 전압제어기는 비활성화 되어있기 때문에 전류제어기에 영향을 주지

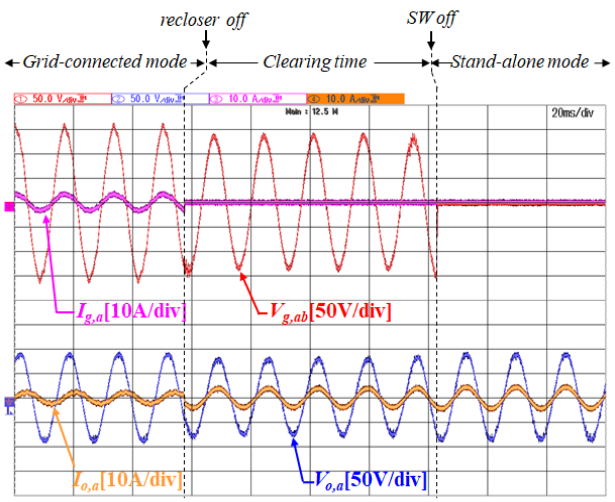

Fig. 14. Experiment waveforms showing mode transition when the grid connected, P=300W, Q=300var, P_{Load}=600W and Q_{Load}=0var.

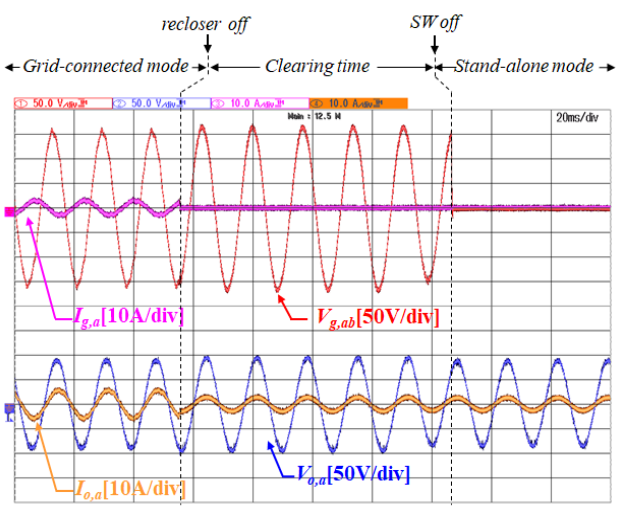

Fig. 15. Experiment waveforms showing mode transition when the grid connected, P=1kW, Q=300var, P_{Load}=500W and Q_{Load}=0var.

TABLE II
EXPERIMENT SYSTEM SPECIFICATION

P	1kW	V_g	110V	f_g	60Hz
L_i	556μH	C_f	16μF	f_{sw}	10kHz

못한다. 단독운전이 발생한 직후(recloser OFF) 전압제어기는 인버터 출력전류와 부하 조건에 따라 자율적으로 전압제어기가 활성화되면서 전압제어를 하게 된다. 그래서 단독운전을 인지하지 못한 clearing time동안에도 정상동작 범위 내에서 전압제어가 되며, 독립운전 모드로 전환 시(SW OFF)에도 과도상태 없이 전환되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계인버터의 모드전환 제어기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 계통연계 모드와 독립운전 모드의 제어 블록을 하나로 통합한 방식이다. 이상적인 상황을 가정한 제어 블록을 통해 제안하는 기법의 개념 및 동작원리를 설명하고 실제 적용 가능한 제어기법을 제안하였다. 그리고 인버터 출력전력과 부하 상태에 따른 경향을 이론적으로 분석하고 동작 모드를 정의하여 출력 전류 방향과 부하에 상관없이 적용이 가능한 제어 기법을 제안하였다. 1kW 3상 인버터 시작품을 통하여 제안하는 기법의 타당성을 증명하였다.

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1A2A2A05001054).

References

[1] D. E. Olivares et al., “Trends in microgrid control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, Jul. 2014.

[2] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, “Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 3, pp. 923-930, Mar. 2011.

[3] C. Liang, Y. Wang, and J. S. Lai, “Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications,” *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 25, No. 1, pp. 1288-1924, Jan. 2010.

[4] Z. Yao, L. Xiao, and Y. Yan, “Seamless Transfer of single-phase grid-interactive inverters between grid-connected and stand-alone modes,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 25, No. 6, 2010.

[5] T. Tran, T. Chun, H. Lee, H. Kim, and E. Nho, “PLL-based seamless transfer control between grid-connected and islanding modes in grid-connected inverters,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 29, No. 10, 2014.

[6] T. Hwang and S. Park, “A seamless control strategy of a distributed generation inverter for the critical load safety under strict grid disturbances,” *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 28, No. 10, pp. 4780-4790, Oct. 2013.

[7] Y. Mohamed and A. Radwan, “Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems,” *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, 2011.

[8] T. Yu, Y. Bae, S. Choi, and H. Kim, "Indirect current control of utility interactive inverter for seamless transfer," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics,* Vol. 11, No. 1, Feb. 2006.

[9] H. Kim, T. Yu, and S. Choi, "Indirect current control algorithm for utility interactive inverters in distributed generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 3, pp. 1342-1347, May 2008.

[10] J. Kwon, S. Yoon, and S. Choi, "Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 27, No. 2, pp. 773-781, Feb. 2012.

[11] H. Oh, S. Choi, T. Kim, G. Lee, and T. Lee, "Anti-islanding method by harmonic injection for utility interactive inverter with critical load," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 4, Aug. 2012.

[12] S. Yoon, H. Oh, and S. Choi, "Controller design and implementation of indirect current control based utility-interactive inverter system," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 28, No. 1, Jan. 2013.

[13] Z. Liu and J. Liu, "Indirect current control based seamless transfer of three-phase inverter in distributed generation," *IEEE Trans. Power Electron,* Vol. 29, No. 7, Jul. 2014

[14] K. Lim and J. Choi, "PR based indirect current control for seamless transfer of grid-connected inverter," in *IEEE IPEMC-ECCE Asia*, Jul. 2016.

[15] S. Park, J. Kim, A. Jung, and S. Choi, "Parallel operation control method of grid-connected inverters with seamless transfer for energy storage system in microgrid," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 21, No. 3, Jun. 2016.

[16] S. Park, M. Kwon, and S. Choi, "Reactive power P&O anti-islanding method for grid connected inverter with critical load," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 34, No. 1, Jan. 2019.

[17] Z. Liu, J. Liu, and Y. Zhao, "A unified control strategy for three-phase inverter in distributed generation," *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 34, No. 1, Jan. 2019.

박성열(朴成烈)

1988년 10월 3일생. 2014년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 박사과정.

권민호(權民浩)

1985년 8월 17일생. 2012년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2014년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2018년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구원 HVDC연구본부 전력변환연구센터 선임연구원.

최세완(崔世琓)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 2019년~현재 IEEE Fellow Member. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 감사.