

병렬 연결된 다수 대 계통연계형 인버터를 위한 단독운전 방지 기법

김동균* · 조상윤* · 이영권*** · 최 익** · 최주엽**

*광운대학교 전기공학과

**광운대학교 로봇학부

***(주)금비전자

The Anti-islanding Scheme for a Number of Grid-connected Inverters Under Parallel Operation

Kim Dong-Kyune* · Cho Sang-Rae* · Choy Ick** · Lee Young-Kwoon** · Choi Ju-Yeop**

*Department of Electric Engineering, Kwangwoon University

**Department of Robotics, Kwangwoon University

***Keumbee Electronics

†Corresponding author: juyeop@kw.ac.kr

Abstract

Anti-islanding scheme of grid-connected inverter is a key function of standards compliance, since unintentional islanding results in safety hazards, reliability, and many other issues. Therefore, many anti-islanding schemes have been researched, however, most of them have problems, which deteriorate performance of islanding detection under parallel-operation. Therefore, this paper proves the reason of problems and proposes a new anti-islanding scheme that has precise islanding detection under parallel-operation in single-phase and three-phase system. Finally, both simulation and experimental result validate the proposed scheme.

Keywords: 계통연계형 PCS(Grid connected PCS), 태양광 인버터(Solar inverter), 병렬 운전 (Parallel operation), 단독운전 방지(Anti islanding)

기호설명

ω : 각속도 (rad/sec)

f_m : 최소 허용 주파수 (Hz)

f_M : 최대 허용 주파수 (Hz)

Q : 무효전력 (Var)

P : 유효전력 (W)

I_{active} : 유효성분 전류 (A)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.3, pp.13-22, June 2017
<https://doi.org/10.7836/kses.2017.37.3.013>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 22 March 2017

Revised: 14 June 2017

Accepted: 21 June 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- $I_{reactive}$: 무효성분 전류 (A)
- I_{readd} : 추가 무효 전류 성분 (A)
- Q_f : 병렬 공진계수

1. 서론

태양광 발전 시스템에서의 단독운전은 안전성과 시스템 보호 측면에서 볼 때, 계통과 시스템 양쪽 모두에 중요한 문제이다. 단독운전은 계통의 사고 또는 정전발생 시 선로의 유지, 보수 및 기타의 사유로 계통을 차단하였을 때 분산전원 시스템이 이를 인식하지 못하여 배전선에 단독으로 전력을 공급하는 현상이다. 단독운전이 발생할 경우 태양광 발전 시스템은 정확한 전압 및 주파수를 검출할 수 없으므로 제어가 불안정해진다. 따라서 비정상적인 전압과 주파수를 갖는 출력이 부하에 공급되므로 전력품질에 악영향을 미치게 되고 계통 수리, 유지관리를 하는 인력 혹은 주변 근접 인력의 안전에 위협을 초래한다. 이와 같이 단독운전 현상의 문제점을 해결하기 위해서 단독운전이 발생하였을 경우 빠르고 정확하게 이를 검출하여 태양광 발전 시스템을 계통으로부터 분리시키는 기능이 인버터에 내장되어야 한다. 단독운전방지를 위한 검출에 대한 연구의 경우 단독운전이 발생하는 빈도가 낮아 연구의 중요성이 떨어지는 분야였지만, 신재생에너지 확대 보급 정책으로 인하여 태양광 발전 시스템을 비롯한 대체에너지 시스템의 설치량이 매우 빠른 속도로 증가하고 있고, 인버터 출력전력의 크기가 증가함으로써 부하 전력과 일치할 가능성이 높아지므로 단독운전의 발생 가능성이 증가하였으며 연구가 활발히 진행되고 있는 시점이다. 현재 Fig. 1에 보이듯 태양광 발전 시스템을 비롯한 계통연계형 발전 시스템의 단독운전방지를 위해 다양한 기법이 연구되었으며 각국의 단독운전 규정을 채택하고 있다. 몇몇 나라들의 경우에는 인버터의 규정을 한 대의 단독운전방지 규정뿐만 아니라 다수대의 인버터를 병렬로 연결하였을 경우의 단독운전방지 규정을 채택하고 있다. 현재 연구된 대부분의 Local 단독운전방지 기법은 주파수를 변화시켜 단독운전을 검출하는 방법을 채택하고 있다. 이 방법의 경우 병렬로 연결된 인버터 사이에 영향을 미쳐 단독운전이 검출되지 않거나 단독운전 정지시간 조건을 만족시키지 못하는 문제가 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 단독운전 발생 시 주파수의 변동을 유도하는 방식에서 병렬운전 시에도 단독운전 검출을 보장할 수 있는 새로운 단독운전 기법을 제안하고, 이를 단상 인버터 및 3상 인버터 두 가지 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 불검출 영역

Fig. 1에서 보시다시피 단독운전 방지 기법은 Remote 기법과 Local 기법으로 분류되며 Local 기법이 다른 별도의 통신장비 없이 검출할 수 있고 구현하기 쉬워 많이 이용되고 있다¹⁾.

인버터의 경우 계통의 이상전압(전압 상승, 전압 하강, 주파수 이상 등) 규정에 따라 인버터는 동작을 멈추게 되어있다. 하지만 계통의 이상전압은 범위로 나뉘어 규정된다. 그래서 계통에 문제가 발생함에도 불구하고 인

버터 동작이 한계치 사이에 있을 경우 인버터가 계통의 문제를 검출하지 못하여 단독운전을 하게 되는데 이때의 영역을 불검출 영역이라고 일컫는다.

Fig. 2는 태양광 인버터와 계통이 연결되어 있는 개념도이다. 분산전원이 병렬로 연결된 부하에 전력을 정상범위에서 전력을 공급해줄 수 있으면 단독운전이 발생한다.

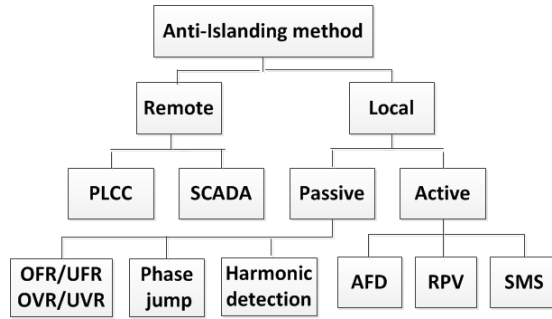


Fig. 1 Classification of anti-islanding method

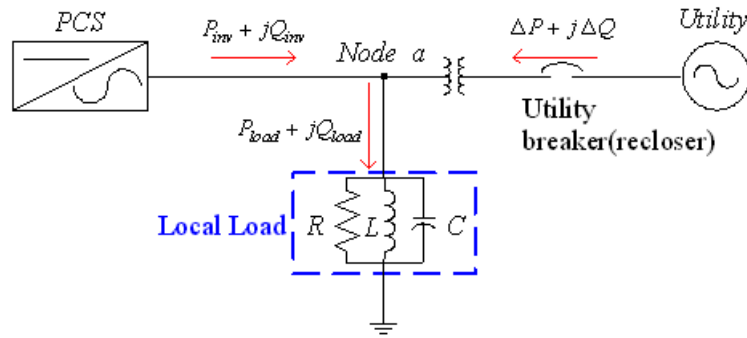


Fig. 2 Configuration of grid-connected PV system

계통이 부하에 공급하는 무효전력이 전체 유효전력의 비율에 따라 주파수에 의한 국내불검출 영역이 Table 1과 같이 발생한다²⁾. 최근 대부분 개발되는 단독운전 기법들은 무효전력을 주입하여 위 표의 불검출 영역을 벗어나게 하는 기법을 개발한다.

Table 1 Non-detection zone with frequency

Range	$Q_f \left[\frac{f_m}{f_G} - \frac{f_G}{f_m} \right] \leq \frac{\Delta Q}{P_{inv}} \leq Q_f \left[\frac{f_M}{f_G} - \frac{f_G}{f_M} \right]$
Domestic Range	$-2.347\% \leq \frac{\Delta Q}{P_{inv}} \leq 1.66\%$

3. 인버터 병렬운전

Fig. 3은 다수대의 인버터를 병렬로 연결하였을 때의 개념도이다. 큰 용량의 태양광 발전 시스템을 운영하기 위해 과거에는 용량이 큰 태양광 인버터를 단일로 사용하였으나, 최근에는 인버터를 병렬로 연결하여 사용한다.

용량이 클 경우 한 대의 부피 및 질량이 커 운반이나 설치가 어려우며 병렬로 연결할 경우 수명과 효율을 높일 수 있어 국내·외에서 인버터를 병렬로 연결하여 많이 사용한다. 하지만 인버터의 병렬운전의 경우 단독운전에 대한 문제가 발생할 수 있다. 현재 국내에서 다양한 단독운전 기법이 연구되고 있지만 대부분이 단일운전 시에만 적용되는 단독운전 기법이다. 하지만 단일 규정에 맞는 단독운전 방지 기법을 사용하더라도 병렬로 연결 시 서로에게 영향을 주어 단독운전의 경우가 발생하게 된다. 그 예로 스페인에 위치한 2.5 MW 태양광 발전소에서 단독운전이 발생하였다³⁾. Fig. 4는 그때의 상황을 나타내는 파형으로써 계통이 차단된 후 약 13분 정도 발전이 지속됨을 나타내고 있다. 이 발전소에서 사용하던 인버터 모두 단일 단독운전방지 시험을 통과하였다.

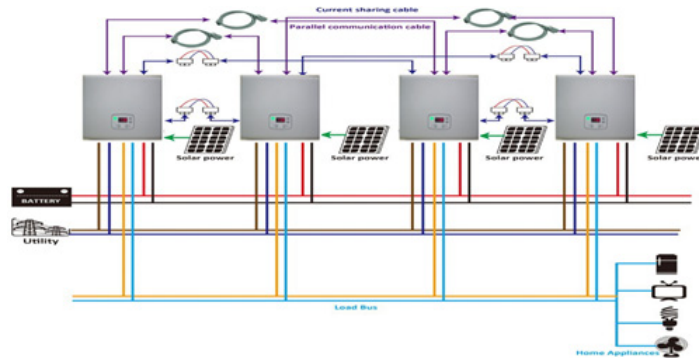


Fig. 3 Concept map of PCS parallel operation

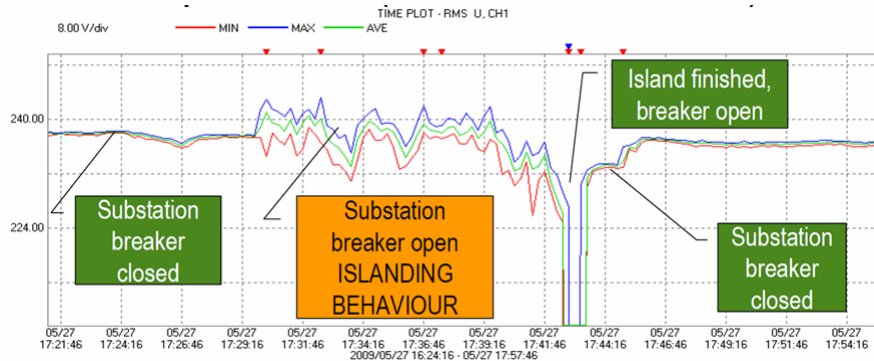


Fig. 4 Example of islanding situation in Spain

4. 단독운전 방지 기법

4.1 기존의 단독운전 방지 기법 및 제안하는 단독운전 방지 기법

현재 개발된 대표적인 단독운전 검출 기법들을 분류하면 Fig. 1과 같다. Remote 방식은 분산전원과 계통 전

원의 통신으로 통해 검출하는 방법이며 Local 방식은 연계점의 전력 상태를 인버터에서 검출하여 단독운전을 검출하는 기법이다.

Local 방식은 별도의 장치가 필요 없이 인버터의 제어기를 통해 구현할 수 있어 많은 연구결과가 있으며 그중 수동적 기법은 주기적으로 임의의 외란을 인가하여 연계점에서의 전압이나 주파수가 정상 범위를 벗어나도록 유도한다⁴⁾. 그러나 이 외란이 병렬운전 시 서로 상쇄하는 경우가 발생하여 단독운전방지를 못 하는 상황이 발생한다.

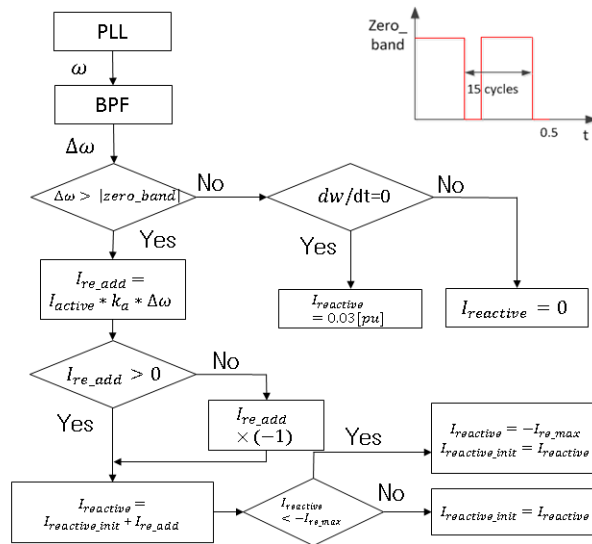


Fig. 5 Algorithm of proposed islanding detection scheme

제안하는 기법의 기본적인 알고리즘은 Fig. 5와 같다. 단독운전을 검출하기 위해 PLL (Phase Locked Loop) 을 통해 계통 전압의 주파수(ω)를 검출한 후, 이를 BPF (Band Pass Filter)를 통해 주파수 변화량($\Delta\omega$) 계산한다. 주파수 변화량을 미리 설정한 범위(Zero_band)와 비교하여 범위를 벗어날 경우 단독운전으로 간주하여 주파수 변화량에 따라 무효전류($i_{reactive}$)를 주입하여 주파수를 증가시키거나 감소시켜 정상범위를 벗어나게 함으로써 단독운전을 방지한다. 하지만 병렬운전시 인버터간의 무효전류가 서로 반대방향으로 추가되어 무효전류 성분을 상쇄시킬 수 있다. 이에 따라 단독운전을 방지하지 못할 수 있어 인버터간에 무효전류를 동일한 방향으로 인가하도록 설정한다. 적절한 무효전류의 값을 설정해주기 위해서는 BPF, Zero band, 무효전류의 최댓값 등을 설정한다⁵⁾.

4.2 BPF 설계

고역대의 노이즈 성분과 정상상태(DC 전압) 근처의 주파수 성분을 제외한 변화의 추종을 위해 LPF와 HPF가 필요하다. 이 두가지의 필터를 설계하기 위해 BPF를 설정하였다. BPF는 식(1)과 같은 전달 함수로 나타낼 수 있다.

$$H(s) = \frac{s}{s + w_{c1}} \cdot \frac{w_{c2}}{s + w_{c2}} \quad (1)$$

국내의 규정에서는 단독운전이 0.5초 이내이기 때문에 이를 위해 BPF의 대역폭을 4~20Hz로 설정한다. 이를 식(1)에 대입하면 식(2)와 같이 BPF를 설계할 수 있다.

$$H(s) = \left(\frac{4 \times 2\pi}{s + 4 \times 2\pi} \right) \times \left(\frac{s}{s + 20 \times 2\pi} \right) = \frac{25.13s}{s^2 + 150.8s + 3158} \quad (2)$$

4.3 Zero_band 설정

BPF를 통해 출력된 $\Delta\omega$ 가 Zero band 이상일 경우에 무효전류가 증가할 수 있는 Loop가 동작하게 된다. 단독운전 검출을 위해 적절한 값으로 범위를 설정해주어야 한다. Zero band가 작으면 전력품질에 악영향을 미칠 수 있고 크게 설정하면 단독운전이 발생되어도 이를 판단하지 못한다. 또한 단독운전이 발생하여도 주파수의 변화가 Zero_band 내에 발생할 수 있어 국내 규정인 0.5초 내에 2회 정도 주기적으로 Zero_band를 0으로 제어함으로써 적은 변화에도 검출이 가능하도록 설정해주어야 한다.

4.4 무효전류의 크기 및 방향 설정

무효전류의 크기는 단독운전이 발생하면 계속 증가하게 되어있다. 하지만 무효전류의 크기는 무한정으로 증가시킬 수 없다. 따라서 제한치를 설정하여야한다. 무효전류의 최댓값 크기는 Table 1에서도 알 수 있듯이 불검출 영역 내에서 검출하기 위해서는 무효전력이 유효전력의 3%이상이 되어야하므로 무효전력의 제한치는 최소한 유효전류의 3%이상이어야 한다. 또한 인버터의 최대용량을 초과하는 전류를 출력하면 인버터가 손상을 입기 때문에 허용할 수 있는 최대 전류보다는 작도록 설정해주어야 한다.

$$Q_{load} = V_a^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \quad (3)$$

마지막으로 식(3)은 부하에서 소비하는 무효전력의 크기이며 전압(V_a)와 부하(L,C)의 크기는 일정하게 유지된 상태에서 계통이 끊기게 된다면 무효전력의 크기에 따라 주파수가 달라진다. 무효전력이 커지면 주파수는 작아지고 무효전력이 작아지면 주파수는 커지게 된다. 이렇게 변화한 주파수의 방향에 따라 진상과 지상이 각각의 인버터에 투입하게 된다. 하지만 병렬운전 되고 있는 인버터가 서로 상쇄되도록 다른 방향으로 무효전류를 투입하게 되면 단독운전을 검출하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 위의 상황을 시뮬레이션과 실험을 통해 증명하였으며 이를 해결하기 위해 Fig. 5와 같이 추가 무효전류 성분이 양의 값이 되도록 설정해 주었다.

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 회로도

Fig. 6은 단상 인버터의 시뮬레이션을 위한 회로도이며 Fig. 7은 삼상 인버터의 시뮬레이션을 위한 회로도이다. 무효전류 및 단독운전 방지 기법만을 확인하기 위해 이상적인 전류원을 사용하였다. DLL 파일을 통해 PLL, 단독운전방지 기법 그리고 출력 전류를 결정한다.

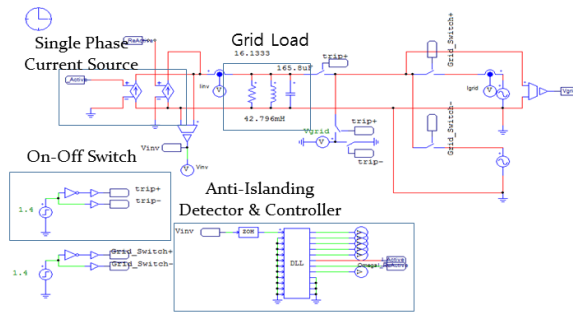


Fig. 6 Simulation circuit of single phase inverter

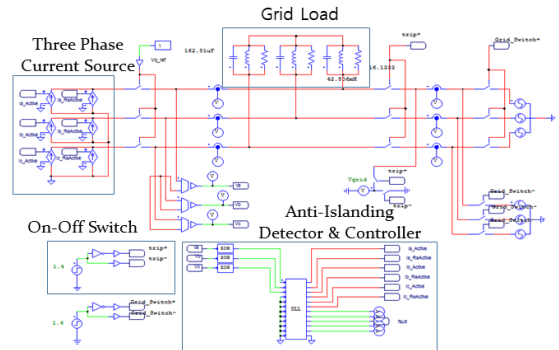


Fig. 7 Simulation circuit of three phase inverter

5.2 단일 운전일 때의 제안하는 단독운전 방지기법

Fig. 8의 왼쪽은 단상 3 kW 그리고 오른쪽은 삼상 12 kW 용량의 인버터에 최대 출력으로 설정한 후 단독운전 방지 알고리즘을 적용하였을 때의 파형이다. 일정 간격으로 무효전력을 주입하여 계통이 끊겼을 때 주파수를 정상 범위를 벗어나게 하여 단독운전방지가 되는 것을 확인할 수 있다.

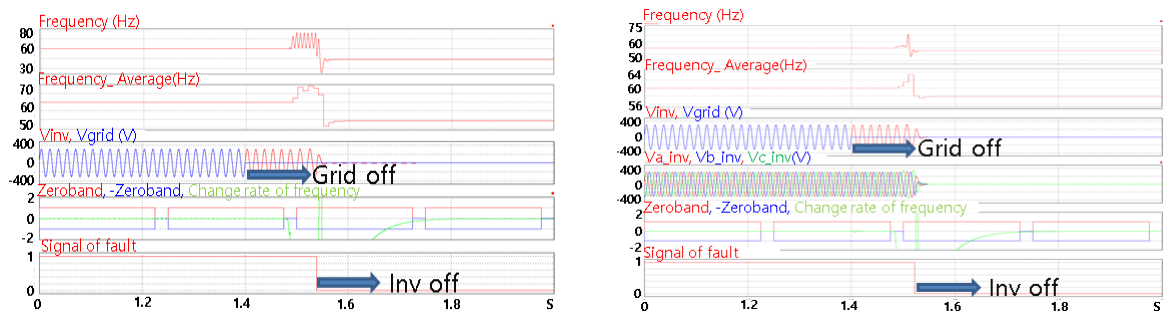


Fig. 8 Waveform with proposed anti-islanding with single operation in single phase and three phase

5.3 병렬운전 시 문제점

Fig. 9는 병렬운전 시 단독운전 알고리즘을 적용하였을 때 무효전력을 한 대는 진상으로 투입하고 다른 한 대는 지상으로 투입하였을 때를 나타내는 파형이다. Fig. 9의 빨간색 원은 무효전력이 반대 방향으로 들어가 상쇄

되어 주파수가 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 이를 무효전력이 서로 상쇄되지 않기 위해 무효전력의 주입을 동일한 방향으로 투입을 하게 되면 인버터간의 간섭 없이 무효전력에 따라 주파수가 변동하게 된다. Fig. 10은 단독운전이 발생 시 무효전력을 같은 방향으로 주입하였을 경우의 파형이다. 같은 방향으로 주입하였을 경우 단상 및 삼상 모두 주파수가 변동하게 되고 계통이 차단된 후 0.5초 내에 인버터 동작이 멈추는 것을 확인할 수 있다.

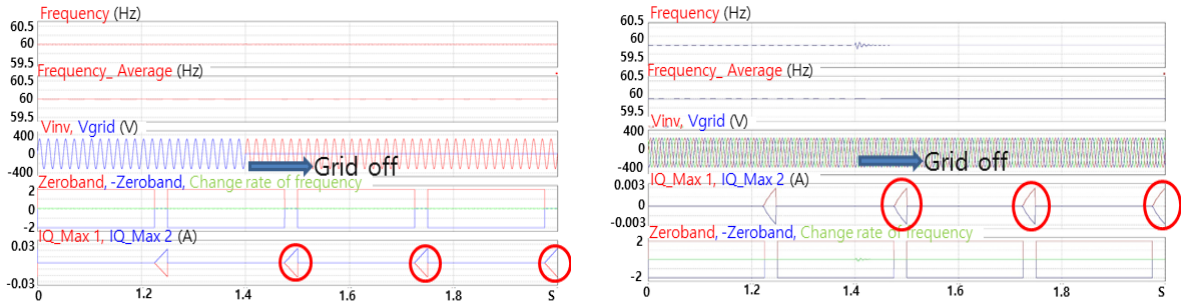


Fig. 9 Waveform under problem of parallel operation in single phase and three phase

시뮬레이션을 통해 병렬운전이 단독운전방지 기법에 영향을 끼치는 것을 확인하였으며 제안하는 단독운전 방지 기법을 통해 단독운전이 방지되는 것을 확인하였다.

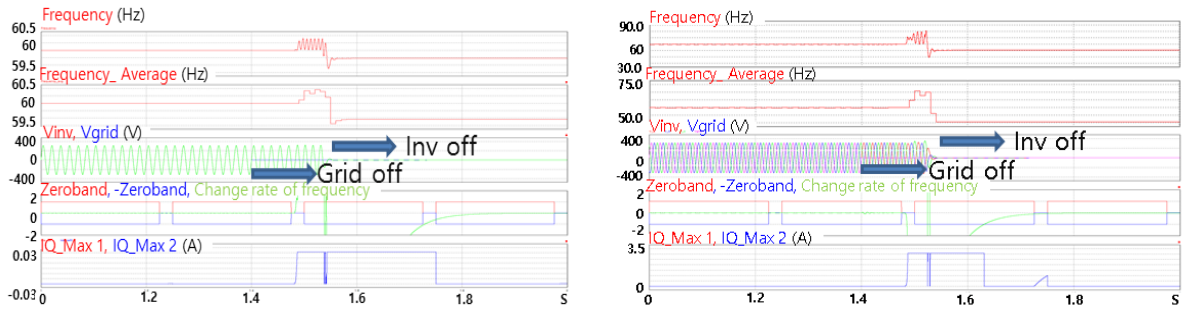


Fig. 10 Waveform with proposed anti-islanding scheme for parallel operation

6. 실험

실험은 금비전자 S12K(12 kW 3상) 5대를 이용하여 실험하였다. Fig. 11과 같이 인버터를 5대 병렬로 연결하고 측정기를 통해 3상부하기를 이용하여 부하에 필요한 전력을 조절하였다.

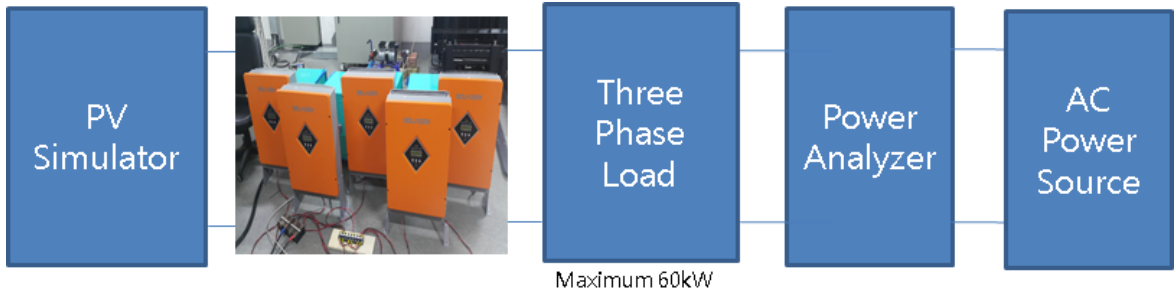


Fig. 11 Configuration of anti-islanding test circuit with 5 solar inverters

Fig. 12는 기존 연구된 단독운전 알고리즘을 적용한 파형이다. 인버터의 무효전력 방향을 일정한 방향으로 하지 않고 인버터가 주파수의 변화를 측정된 방향으로 무효전력을 투입하도록 하였다. 인버터 주파수 변화량 계산 오차 등으로 무효전력 투입이 상쇄되는 방향으로 서로 영향을 주어 주파수가 정상적인 범위 내에서 지속적으로 작동하는 것을 보여준다. 주파수의 파형에서 주파수가 증가하고 감소함을 반복하는데 이는 무효전력을 서로 상쇄함을 나타낸다.

Fig. 13는 제안하는 알고리즘을 적용하였을 때 실험 파형이다. 파형과 같이 주파수가 증가하여 인버터 동작이 멈추는 것을 확인할 수 있다. 주파수 변화량의 부호에 상관없이 주파수가 증가하는 방향으로 무효전력을 투입함으로써 서로 영향을 받아 무효전력이 상쇄됨이 없이 단독운전 방지가 되는 것을 확인하였다.

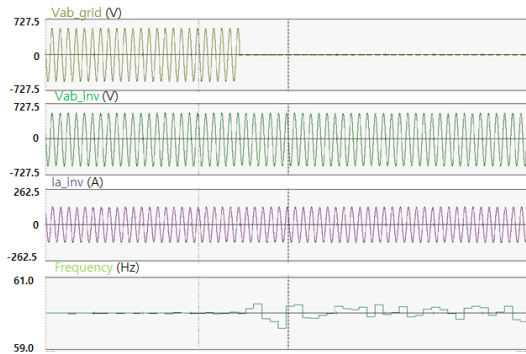


Fig. 12 Result of test with existing anti-islanding scheme

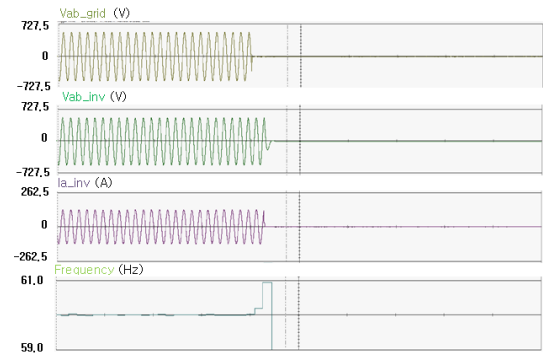


Fig. 13 Result of test with proposed anti-islanding scheme

7. 결론

다수대의 인버터를 병렬로 운영할 경우 인버터 간 영향을 끼쳐 단독운전 검출을 하지 못하는 위험한 상황이 발생함을 확인하였다. 병렬운전 시에도 단독운전을 검출할 수 있는 알고리즘이 필요한 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 증명하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존의 단독운전 검출 기법은 무효전력을 투입하여 주파수 변동을 일으켜 단독운전을 검출한다. 하지만

병렬운전 시 서로 다른 방향으로 무효전력을 투입하여 서로 상쇄할 수 있는 가능성이 있어 단독운전을 검출하지 못할 수도 있다.

- (2) 병렬운전시에도 안정적으로 동작하는 단독운전 검출 알고리즘이 필요하며 본 논문에서는 단독운전 방지를 위해 주입하는 무효전력의 부호를 통일하여 다수 대의 병렬인버터가 동작하더라도 안정적으로 단독운전을 검출함을 확인하였다.

후기

본 연구는 중소기업청 산학연협력 기술개발사업(과제번호: C0453732), 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 (과제번호: R17XA05-26) 및 2015년도 광운대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. Ye, Z., Kolwalkar, A., Zhang, Y., Du, P., and Walling, R., Evaluation of Anti-islanding Schemes Based on Non-detection Zone Concept, Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on Digital Object Identifier, pp. 1171-1176, 2004.
2. Lee, K. O., Output power analysis for active frequency drift method, Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 29, No. 6, pp. 75-80, 2009.
3. Jung, Y. S., Islanding Detection Function of Grid-connected Power Conditioning System of Parallel Operation, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1100-1101, 2013.
4. Jo, Y. M., Analysis of Anti-Islanding Schemes using Frequency Drift in Distributed Generation System, Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 20, No. 3, pp. 247-254, 2015.
5. Jo, Y. M., Detection Performance and THD Analysis of Active Frequency Drift for Anti-islanding, Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 35, No. 2, pp. 11-19, 2015.