

계통연계형 태양광 인버터 병렬운전 상황에서의 단독운전 검출

조영민¹, 김동균², 송승호², 최익³, 이영권⁴, 조상윤⁵, 최주엽[†]

Islanding Detection for Grid-connected PV Inverter under Parallel Operation

Yeong-Min Jo¹, Dong-Gyun Kim², Seung-Ho Song², Ick Choy³,
Young-Kwoun Lee⁴, Sang-Yoon Cho⁵, and Ju-Yeop Choi[†]

Abstract

Islanding protection of a grid-connected photovoltaic (PV) inverter is a key function for standards compliance. Unintentional islanding results in safety hazards, reliability, and many other issues. Therefore, many anti-islanding schemes have been examined. However, existing anti-islanding schemes have poor power quality and non-detection zone issues. Moreover, most schemes have problems that deteriorate the performance of islanding detection under parallel operation. Therefore, this paper proposes a novel anti-islanding scheme that has negligible power quality degradation and has no non-detection zone and islanding detection under a parallel operation. Both simulation and experimental results validate the proposed scheme.

Key words: Grid-connected photovoltaic inverter, Anti-islanding, Parallel operation, NDZ(Non Detection Zone), THD(Total Harmonic Distortion)

1. 서 론

태양광 발전 시스템과 같은 분산전원 시스템이 전력 계통과 연계되어 운전하기 위해서는 다른 수용가 및 계통에 피해를 주지 않도록 고조파 억제, 역률 개선, 직류 성분 제거, 과도현상 보호, 단독운전 방지 등과 같은 기술적 문제점을 해결해야 한다.

그중에서 단독운전은 발생하는 빈도가 낮아 연구의 중요성이 떨어지는 분야였지만, 최근 신·재생에너지 확

대 보급 정책으로 인하여 설치량이 매우 빠른 속도로 증가하고 있고, 단일 시스템의 용량도 점점 증가하고 있는 추세이다. 따라서 인버터의 출력 전력의 크기가 부하 전력과 일치할 가능성이 높아지면서 이로 인하여 단독운전의 발생 가능성이 증가한다. 따라서 단독운전 검출에 대한 필요성이 높아지고 있고, 간단하면서도 신뢰성 높은 검출기법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있는 시점이다.

그림 1은 계통연계형 태양광 발전 시스템의 구성도를 나타낸다. 이러한 계통연계 시스템은 상용계통과 연계되어 운전하는데, 단독운전 현상은 계통의 정전 발생 시, 선로의 유지, 보수 및 기타의 사유로 계통 전력이 차단되었을 때 분산전원 시스템이 이를 인식하지 못하고 배전선에 단독으로 전력을 공급하는 현상이다.

이러한 단독운전이 발생할 경우 계통연계형 태양광 인버터에서 정확한 전압 및 주파수를 검출할 수 없으므로 제어가 불안정해지고, 비정상적인 전압과 주파수를 갖는 출력이 부하에 공급되므로 전력품질에 악영향을 미치게 되고 계통 수리, 유지 관리를 하는 인력 혹은 주변 근접 인력의 안전에 위협을 초래한다^[1].

Paper number: TKPE-2016-21-4-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: juyeop@kw.ac.kr

Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Tel: +82-2-940-5146 Fax: +82-2-943-8147

¹ Innovation R&D Center, Dawonsys

² Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

³ Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon Univ.

⁴ Keumbee Electronics

⁵ Dahan Tech

Manuscript received Jan. 26, 2016; revised Mar. 8, 2016;
accepted Apr. 24, 2016

— 본 논문은 2015년 추계학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2015년 추계학술대회 외부장학금 수혜논문임

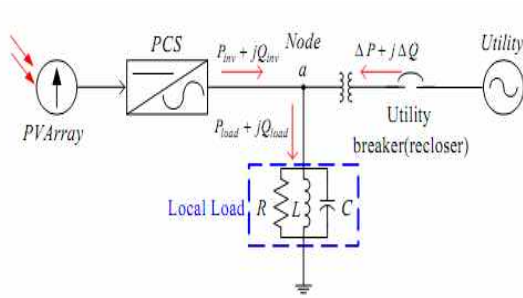


Fig. 1. Configuration of grid-connected PV system.

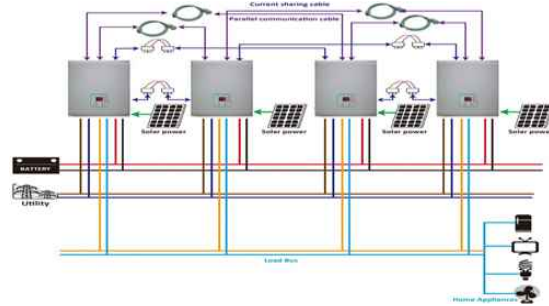


Fig. 2. Concept map of PCS parallel operation.

이와 같은 단독운전 현상의 문제점을 방지하기 위해서 단독운전이 발생하였을 경우에 빠르고 정확하게 이를 검출하여 분산전원 시스템을 계통으로부터 분리시키는 기능이 인버터에 반드시 내장되어야 한다.

따라서 현재까지 국·내외에 다양한 단독운전 검출기법들이 개발되었다. 하지만 기존의 대부분의 검출기법들은 규정에 만족하는 검출 특성을 만족하지만, 정상상태 시 전력품질에 악영향을 끼치게 된다. 뿐만 아니라 단일 인버터 운전 시만을 고려하였고, 다수대 인버터의 병렬 운전 시 검출 특성 저하에 대하여 고려하지 않았다. 그래서 단일 인버터 동작 시에는 단독운전 검출이 가능하더라도 병렬로 연결된 상황에서는 단독운전 검출이 불가능하거나 검출 시간 조건을 만족시킬 수 없는 문제점이 발생한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 인버터 병렬운전 상황에서의 단독운전 검출 성능 저하에 대하여 알아본다. 또한, 이러한 기존의 검출기법들이 가지는 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 전력품질에 악영향을 끼치지 않으면서 병렬운전 상황에서도 단독운전 검출이 가능한 새로운 단독운전 검출 알고리즘을 제안한다. 그리고 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 단독운전 검출 성능과 전력품질에 미치는 영향을 검증한다.

2. 인버터의 병렬운전

2.1 인버터 병렬운전의 장점

현재 태양광 발전을 비롯한 분산전원의 용량의 증가에 따라 PCS(Power Conditioning System) 또한 대용량화되고 있는 추세이다. 하지만 단일 대수의 대용량 PCS를 사용하는 것보다 그림 2와 같이 다수대의 소용량 PCS를 병렬로 연결하여 사용하는 것이 시스템의 효율과 수명을 증가시킬 수 있는 장점을 가진다.

그림 3은 각 용량별로 대용량 PCS 1대와 다수대 소용량 PCS의 효율과 THD를 비교한 결과를 통해 알 수 있듯이 대용량화 될수록 PCS를 병렬운전하는 것이 효율과 THD 측면에서 유리함을 알 수 있다.^[2] 또한, 일사량이 적을 때에는 필요한 수의 PCS만 순차적으로 동작하도록 하여 PCS의 수명을 증가시킬 수 있다.

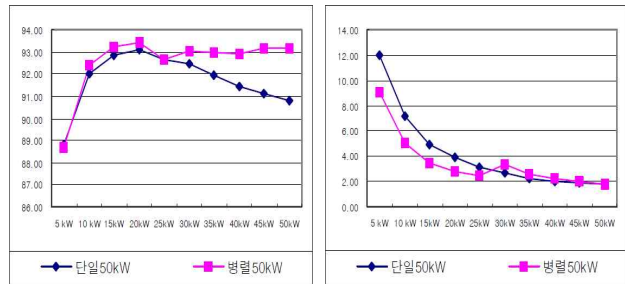


Fig. 3. Efficiency and THD comparison of single and parallel PCS.

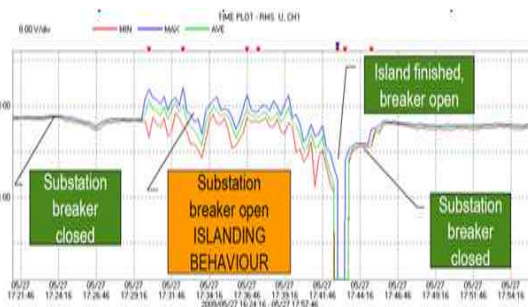


Fig. 4. Example of islanding situation in real.

2.2 인버터 병렬운전의 검출 성능 저하

위와 같은 장점들 때문에 현재 국내·외에서 다수대의 인버터를 병렬로 연결하여 운전한다. 하지만 이러한 인버터 병렬운전에서 해결해야할 문제 중의 하나가 단독운전 검출 문제이다.

현재 국내에 다양한 단독운전 검출기법들이 개발되었지만, 모두 단일 인버터의 경우에 대해서만 고려하였고, 관련 규정 역시 단일 인버터 기준으로 규제가 진행되어 왔다. 하지만 단일 인버터 단위의 단독운전 검출 성능시험을 통과하였더라도 병렬운전 상황에서는 단독운전 검출 성능이 저하되거나 검출하지 못할 가능성이 존재한다. 이러한 문제의 한 예로서 스페인에 위치한 2.5MW 태양광 발전소에서 단독운전 현상이 발생하였다. 그림 4는 시간에 따른 발전소의 발전량을 나타내는데, 계통이 차단된 후 약 13분 정도 발전이 지속된 것을 확인할 수 있다. 이 발전소에서 사용하고 있는 PCS는 250kW 인버터로 모두 시험소에서 단독운전 시험을 통과한 인버터임에도 불구하고 병렬운전 상황에서 단독운전을 검출하

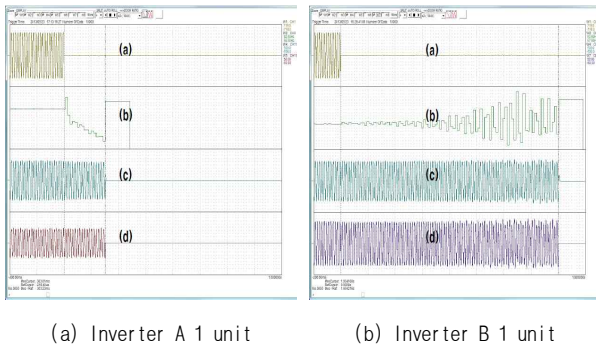


Fig. 5. Islanding test result of A and B inverter.

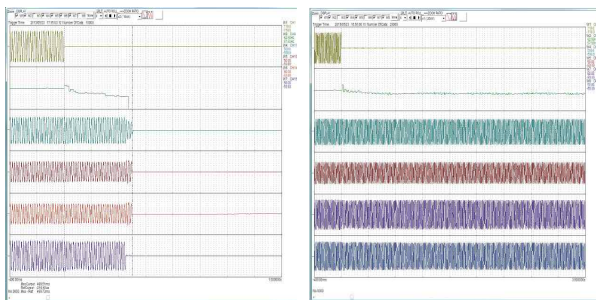


Fig. 6. Islanding test result of A and B inverter under parallel operation.

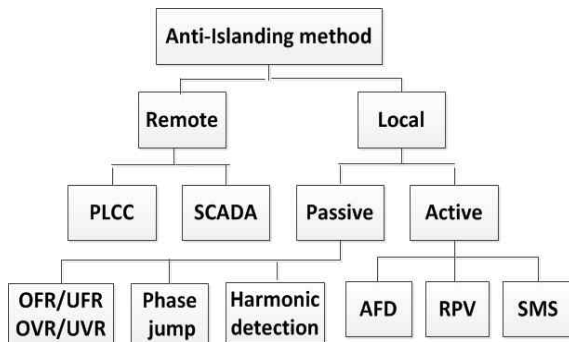


Fig. 7. Classification of anti-islanding method.

TABLE I
AN ABBREVIATION OF FIG. 7

Abbreviation	Full word
PLCC	Power Line Carrier Communication
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
OFR / UFR	Over / Under Frequency Relay
OVR / UVR	Over / Under Voltage Relay
AFD	Active Frequency Drift
RPV	Reactive Power Variation
SMS	Slip Mode frequency Shift

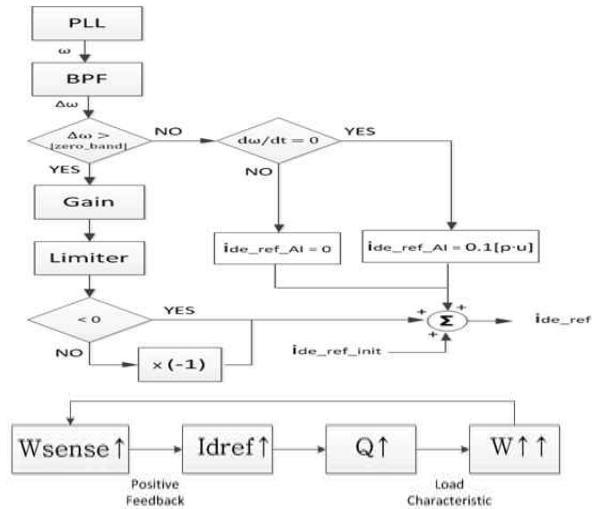


Fig. 8. Algorithm of proposed islanding detection scheme.

지 못하는 문제를 실제로 보여주고 있다.^[3]

또한, 국내에서도 이러한 문제를 검증하기 위하여 국내의 A사 인버터와 해외의 B사 인버터를 대상으로 병렬운전 시 단독운전 검출 성능 시험을 진행하였다^[4]. 그 결과 그림 5와 같이 단일 인버터 운전 시에는 두 인버터 모두 단독운전 검출에 성공하였지만, 그림 6과 같이 A사 인버터와 B사 인버터의 병렬운전 시에는 단독운전 검출 시간이 규정치를 넘어서거나 불가능함을 확인할 수 있다.

3. 단독운전 검출기법

3.1 기존의 단독운전 검출기법

현재 개발된 대표적인 단독운전 검출기법들을 분류하면 그림 7과 같다. 단독운전 검출기법은 크게 구현 주체에 따라 계통에 설치되어 있는 통신 장치를 통하여 계통의 이상을 검출하는 Remote 방식과 분산전원과 계통 연계점의 전력 상태를 확인하여 검출하는 Local 방식으로 분류된다.

그중 Local 방식은 별도의 장치를 필요로 하지 않기 때문에 대부분의 소용량 계통 연계 시스템에서 사용되고 있고, 단독운전 현상을 검출하는 방식에 따라 수동적 기법과 능동적 기법으로 나눌 수 있다.^[5]

수동적 기법은 연계점의 전력 상태를 단순히 모니터링하고 연계점의 전압 및 위상 변동에 의하여 검출하므로 정상상태에서도 오동작을 일으킬 수 있으며 분산전원에서 공급하는 전력과 부하에서 소비하는 전력이 평형을 이루었을 때 단독운전 검출이 불가능할 수 있다.

이에 반해, 능동적 기법의 경우 분산전원 시스템의 출력에 주기적으로 임의의 외란을 인가하여 연계점에서의 전압이나 주파수가 정상 범위를 벗어나도록 유도하여 단독운전을 검출하는 방법으로 수동적 기법에 검출 성능이 우수하다. 그러나 현재 개발된 검출기법들은 주기

적으로 외란을 인가하므로 이 외란에 의해 전력 품질에 안 좋은 영향을 끼치게 된다.^[6-7]

3.2 제안하는 단독운전 검출기법

위에서 언급하였듯이 현재 개발된 단독운전 검출기법 들은 단일 인버터 운전 상황만을 고려하여 개발되었다. 따라서 본 논문에서는 정상상태에서 전력품질에 악영향을 미치지 않으면서 인버터 병렬운전 상황에서도 단독운전 검출할 수 있는 새로운 단독운전 기법을 제안한다.

제안하는 검출 알고리즘은 그림 8과 같이 단상 인버터의 출력을 D-Q 변환 후 PLL(Phase Locked Loop)을 통해 인버터 출력 전압의 ω 를 검출하고, 이를 BPF(Band Pass Filter)를 거친 후 출력되는 값을 미리 설정해 놓은 zero_band보다 클 경우에 단독운전 현상으로 판단하여 $\Delta\omega$ 에 gain을 곱한 값을 무효전류 지령치 i_{d-ref} 에 더해주어 무효전력을 증가시키게 되고, 이는 다시 $\Delta\omega$ 를 키워 결국 주파수가 정상범위를 벗어나게 하여 인버터의 출력을 정지한다. 이때, $\Delta\omega > 0$ 일 경우에는 부호를 반전시켜 진상 무효전류만을 주입하게 하여 주파수를 감소시키는 방향으로만 동작하게 된다. 따라서 다수대의 인버터가 병렬연결 되어있더라도 상호 간섭이 일어나지 않아 단독운전 검출이 가능하게 된다. 또한, 만일 $\Delta\omega$ 가 정확히 0이면 검출이 불가능하므로, 시간에 대한 ω 의 미분 값이 0이면 소량의 무효전류를 주입하여 $\Delta\omega$ 가 발생하도록 한다. 계통이 정상적이라면 $\Delta\omega$ 가 다시 0으로 수렴하지만, 계통이 차단된 상태라면 알고리즘에 의해 $\Delta\omega$ 가 더욱 커지게 되어 모든 상황에서 단독운전 검출이 가능하게 된다.

4. 시뮬레이션

국내 인증관련 기술기준인 “태양광 발전용 인버터 설비 심사기준의 세부 심사기준”을 참고하여 표 2와 같이 파라미터를 선정 한 후 시뮬레이션 프로그램 PSIM을 사용하여 시뮬레이션 회로를 구성하였다. 단독운전 발생 시 주파수 변화가 없어 단독운전을 검출하기에 최악의 경우인 R, L, C 부하의 공진 조건을 만족하도록 설정하였으며, 계산된 R, L, C 부하의 경우 실제 인버터에서 자체적으로 발생하는 무효전력 성분까지는 고려되지 않았다.

우선 단일 인버터의 경우 단독운전 검출 성능을 확인하기 위하여 그림 9과 같이 회로를 구성하여 시뮬레이션 한 결과 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 그림 10과 같이 계통 차단 전·후 출력 전압 및 주파수에 변화가 없어 단독운전이 지속되는 것을 확인할 수 있다.

이와 반대로 검출 알고리즘을 적용하였을 경우 그림 11과 같다. 단독운전 발생 시 초기 $\Delta\omega$ 가 zero_band 내에 존재하였다 하더라도, zero_band를 0으로 가변했을

TABLE II
PARAMETER OF SIMULATION

Parameter	Value
V_{util}	220V
f_0	60Hz
P_{inv}	3kW
P_{load}	3kW
R	16.13Ω
L	42.795mH
C	165.5163uF
Q_f	1.0
Nominal frequency range	59.3Hz < f < 60.5Hz

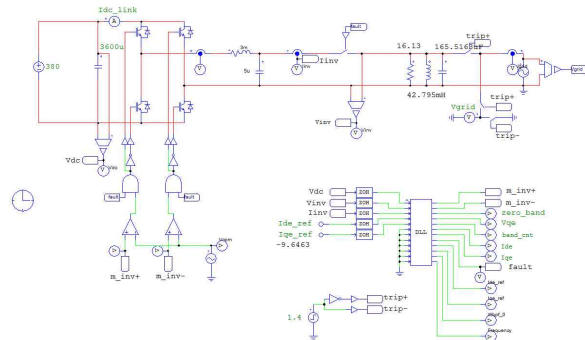


Fig. 9. Simulation circuit under single inverter operation.

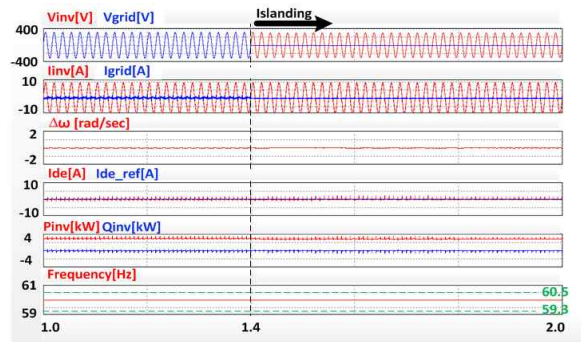


Fig. 10. Waveform without anti-islanding scheme under single inverter operation.

시 L, C 부하의 공진에 의하여 생긴 $\Delta\omega$ 를 이용해 검출 알고리즘이 동작하면서 단독운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 병렬운전 상황에서의 단독운전 검출 성능을 확인하기 위하여 그림 12와 같이 인버터 2대 병렬운전 상황에서 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 그림 13과 같다. 단일 인버터의 경우와 동일하게 단독운전 발생 시 초기 $\Delta\omega$ 가 zero_band 내에 존재하였다 하더라도, zero_band를 0으로 가변하면서 검출 알고리즘이 동작하면서 인버터 간의 상호간섭 없이 단독운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다.

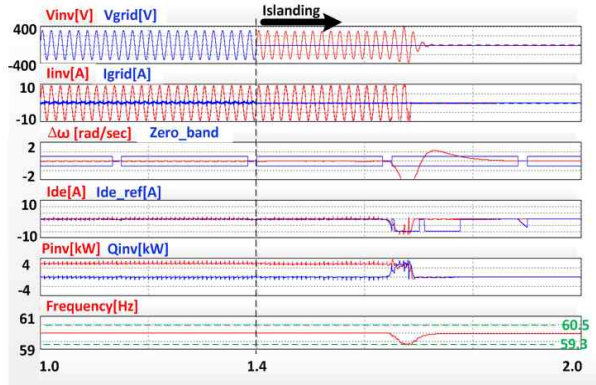


Fig. 11. Waveform with proposed anti-islanding scheme at reasonable gain and varied zero band.

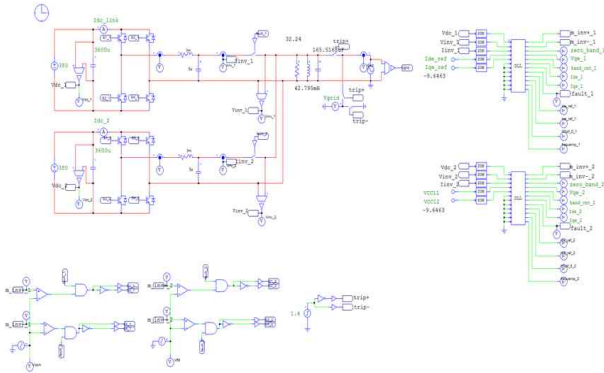


Fig. 12. Simulation circuit under parallel operation.

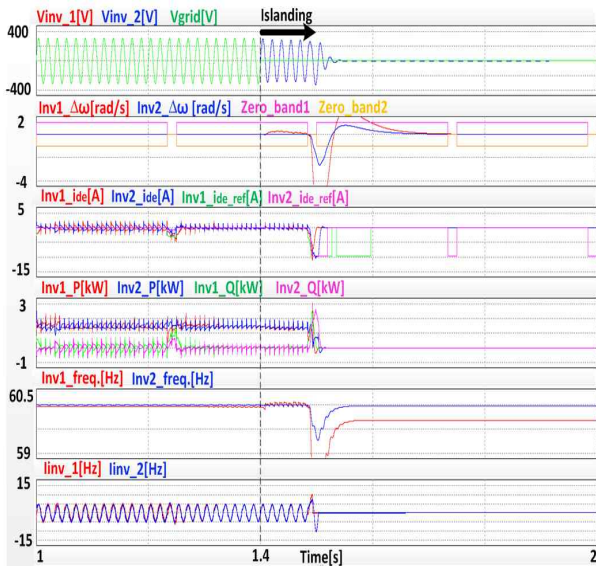


Fig. 13. Waveform with proposed anti-islanding scheme under parallel operation.

이때 만약 인버터에서 각각 다른 방향으로 무효전력을 주입하게 된다면 그림 14와 같이 연계점에서 서로 상쇄되며 단독운전 검출이 불가능함을 확인할 수 있다.

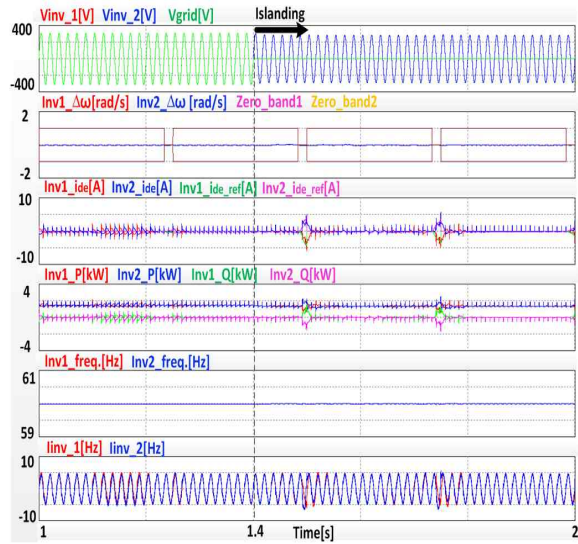


Fig. 14. Waveform under parallel operation with injection opposite reactive power.

5. 실험

실험회로의 파라미터 선정은 최대한 시뮬레이션 조건과 같이하여 단일 인버터의 경우와 인버터 2대 병렬운전 상황에서의 단독운전 검출 실험을 진행하였다.

실험 세트의 경우 그림 15와 같이 구성하였고, 그림 16에 보이는 PV array를 대체할 수 있는 태양광 시뮬레이터 pCube를 사용하였고, 계통연계형 단상 인버터 S35K를 사용하였다. 또한, AC power source를 사용하여 grid를 구성하였고, 전자 부하와 슬라이닥스, 콘덴서 박스를 사용하여 병렬 R, L, C 부하를 구성하였다.

단일 인버터의 경우 그림 15에서 인버터 1대만을 사용했기 때문에 별도의 실험 구성도는 생략하였으며, 단독운전 검출 알고리즘 적용 전·후의 실험 결과는 그림 17과 그림 18과 같다.

시뮬레이션 결과와 마찬가지로 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 계통이 차단되어도 출력 전압 및 주파수가 거의 변동하지 않아 단독운전 검출이 불가능함을 그림 17을 통하여 확인할 수 있다. 하지만 알고리즘을 적용하면 미소한 주파수 오차에 따라 무효전력을 주입하면서 주파수를 정상범위 밖으로 유도하여 단독운전 검출이 가능함을 그림 18을 통하여 확인할 수 있다.

또한, 병렬운전 상황에서의 단독운전 검출 성능을 확인하기 위하여 그림 15와 같이 실험 세트를 구성하여 실험한 결과는 그림 19와 같다. 시뮬레이션을 통하여 검증한 결과와 같이 단독운전 발생 시 각 인버터 간 상호 간섭 없이 단독운전 검출이 가능함을 확인할 수 있다. 그리고 만약 각 인버터에서 서로 상반되는 무효전력을 주입할 경우 주입하는 무효전력이 연계점에서 상쇄되어 그림 20과 같이 주파수가 정상범위 내에서만 변동하면서 단독운전 검출이 불가능함을 확인할 수 있다.

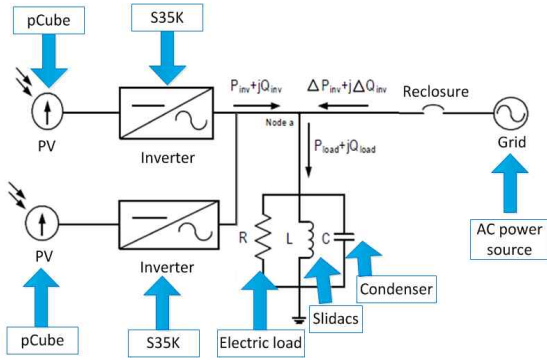


Fig. 15. Configuration of anti-islanding test circuit under parallel operation.



Fig. 16. PV Simulator(pCube) and inverter(S35K).

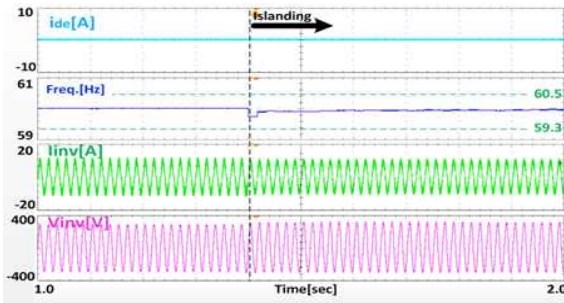


Fig. 17. Result of test without any anti-islanding scheme under single inverter operation.

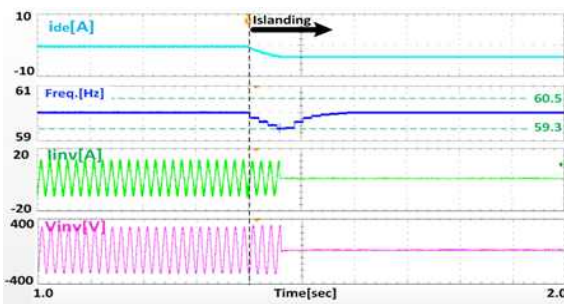


Fig. 18. Result of test with proposed anti-islanding scheme.

마지막으로 본 검출기법이 정상상태 시 전력품질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 알고리즘 적용 전·후의 출력 전류의 THD를 분석한 결과 그림 21과 같다. 이 결과를 통하여 본 논문에서 제안하는 검출기법이 전력 품질에 영향을 전혀 끼치지 않음을 확인할 수 있다.

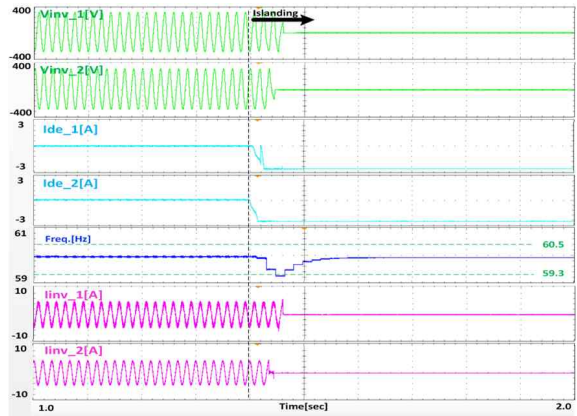


Fig. 19. Result of test with proposed anti-islanding scheme under parallel operation.

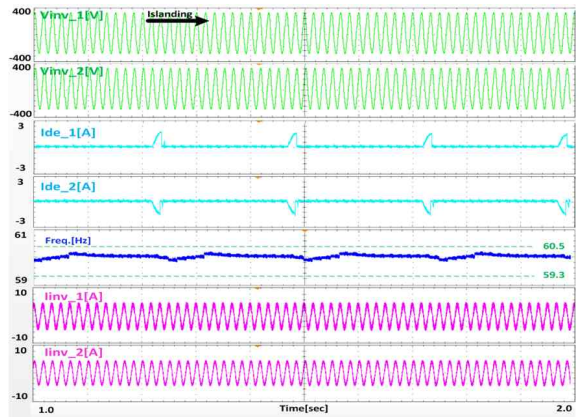


Fig. 20. Result of test under parallel operation with injection opposite reactive power.

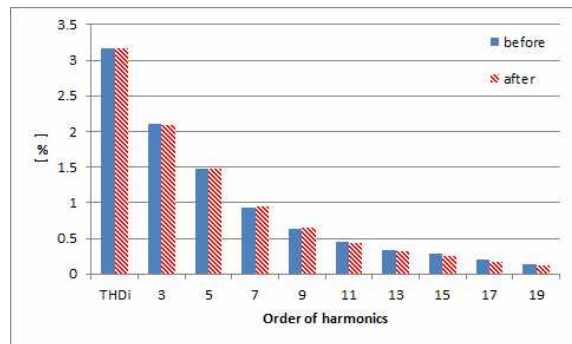


Fig. 21. Comparison of output current harmonics by proposed algorithm.

6. 결론

다수대 인버터를 병렬로 연결하여 운전할 경우 효율 및 인버터 수명 등에 장점이 있지만, 이 경우 단독운전 검출 성능의 저하가 발생함을 확인하였다. 또한, 기존의 단독운전 검출기법들에 대하여 간략히 설명하였고, 각각 장·단점을 가지지만 모두 단일 인버터의 경우만 고려하

였기 때문에 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 검출기법을 제안하였다.

그리고 제안하는 알고리즘의 검출 성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였고, 정상상태 시 전력품질에 끼치는 영향도 분석하였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 검출기법이 전력품질에 영향을 끼치지 않으면서 인버터 병렬운전 상황에서도 단독운전 검출이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 광운대학교 교내연구비 지원사업과 중소기업청에서 지원하는 구매조건부 신제품개발사업(S2285714)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] K. O. Lee, "Output power analysis for active frequency drift method," *Journal of the Korea Solar Energy Society*, Vol. 29, No. 6, pp. 75-80, Dec. 2009.
- [2] J. S. Moon, "Development of 50kW grid-connected photovoltaic inverter for dispersed station generation," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 521-523, Jul, 2007.
- [3] On site tests in large PV plants relating to islanding, *CIRED 2009*, 2009.
- [4] Y. S. Jung, "Islanding detection function of grid-connected power conditioning system of parallel operation," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 1100-1101, Jul. 2013.
- [5] Y. M. Jo, "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, Apr. 2015.
- [6] Y. Takeda, "Study of utility interface and control problems for residential PV systems in rokko island 200kW test facility," *Proc. of IEEE PVSC'98*, Vol. 2, pp. 1062-1067, 1998.
- [7] W. Bower and M. Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems," *IEA-PVPS Report*, IEA-PVPS T5-09, 2002.



조영민(趙榮敏)

1990년 2월 27일생. 2014년 광운대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 다원시스 기술혁신행연구소 연구원.



김동균(金東均)

1991년 1월 16일생. 2016년 광운대 전기공학과 졸업. 2016년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 교수.



최익(崔翼)

1956년 6월 5일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~2003년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 2003년~현재 광운대 로봇학부 교수.



이영권(李映券)

1962년 8월 5일생. 1981년 한양공고 자동차공학과 졸업. 1990년~1996년 오성전자 대표이사. 1997년~현재 금비전자 대표이사.



조상운(曹常倫)

1967년 4월 26일생. 1993년 인하대 컴퓨터공학과 졸업. 1995년~1998년 (주)유진데이 타근무. 1998년~현재 (주)다한테크 대표이사. 2014년~현재 광운대 대학원 전기공학과 석사과정.



최주엽(崔宙燁)

1961년 2월 11일생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 Texas Univ at Arlington 졸업(석사). 1994년 Virginia Tech. Post Doc. 1995년~1999년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 선임연구원. 2000년~현재 광운대 전기공학과 교수.