

병렬운전하는 계통연계형 태양광 발전용 인버터의 단독운전 검출 성능 분석

Performance Analysis of Anti-islanding Function for Grid-connected PV Inverter Systems under Parallel Connections

정영석* · 유병규**† · 강기환***

Jung Young-Seok*, Yu Byung-Gyu**†, and Kang Gi-Hwan***

(Submit date : 2013. 8. 8., Judgment date : 2013. 8. 12., Publication decide date : 2013. 9. 30.)

Abstract : Islanding phenomenon of photovoltaic system is undesirable because it leads to a safety hazard to utility service personnel and may cause damage to power generation and power supply facilities as a result of unsynchronized re-closure. Anti-islanding protection is an important technical requirement for grid-connected PV system. Until now, various anti-islanding methods for detecting and preventing islanding of photovoltaic and other distributed generations have been proposed. Most of them are focusing on the anti-islanding performance of single PV system according to the related international and domestic standard test procedures. There are few studies on the islanding phenomenon for multiple photovoltaic operation in parallel. This paper presents performance analysis of anti-islanding function for grid-connected PV inverter systems when several PV inverters are connected in parallel.

Key Words : 단독운전 방지(Islanding phenomenon prevention), 병렬운전(Parallel operation), 계통연계형 태양광 시스템(Grid-connected photovoltaic system), 전력변환(Power conditioning), 제어알고리즘(Control algorithm)

**† 유병규(교신저자) : 공주대학교 전기전자제어공학부, **† Yu Byung-Gyu(corresponding author) : Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University.
E-mail : bgyuyu@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9162

*정영석 : 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단

***강기환 : 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단

E-mail : bgyuyu@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9162

*Jung Young-Seok : Solar Energy Center, Korea Institute of Energy Research

*** Kang Gi-Hwan : Solar Energy Center, Korea Institute of Energy Research

기 호 설 명

Q_f	: 공진 지수
Q_L	: 지역 유도성 부하(Var)
Q_C	: 지역 용량성 부하(Var)
P_R	: 지역 저항성 (W)
P_I	: 태양광 유효 출력전력 (W)
Q_I	: 태양광 무효 출력전력 (Var)
ΔP	: 계통 유효전력(W)
ΔQ	: 계통 무효전력(W)
R	: 지역 저항성 부하(Ω)
L	: 지역 유도성 부하(H)
C	: 지역 용량성 부하(F)
f	: 주파수(Hz)
OFR	: 과주파수 릴레이
UFR	: 저주파수 릴레이

1. 서 론

현대의 전력계통시스템은 환경오염 및 화석연료의 고갈 문제 등으로 태양광 발전 등의 신재생에너지 분산발전원이 널리 보급됨에 따라, 점점 더 복잡한 형태로 구성되고 있는 실정에 있다. 이러한 계통에 연계된 태양광발전시스템의 적극적인 대두로 인해 전력 계통상의 안정성과 전력 품질에 대한 우려가 제기되고 있는데, 그 중 가장 큰 주목을 받고 있는 것이 태양광발전원의 단독운전 현상이다.

Fig. 1에서처럼 계통연계형 태양광 발전시스템의 단독운전 현상은 연계된 상용계통이 정전이 발생하였음에도 불구하고, 태양광 발전이 정지하지 않고 지속적으로 단독으로 발전을 지속하는 것으로 정의된다. 이러한 단독운전 현상으로 인해 발생하는 문제점을 크게 두 가지로 요약할 수 있는데, 첫째, 정전으로

인식한 계통유지요원의 안전사고를 일으킬 수 있으며, 둘째, 상용계통이 정전이었다가 복전 시 상용계통 전압과 태양광 발전 전압의 비동기 재접속으로 인한 주변 설비의 손상을 일으킬 수 있다는 점이다.

이러한 단독운전현상을 방지하기 위해서, 태양광 인버터 쪽에서 단독운전을 방지하는 지역적 방법(Local AIM: Anti-islanding Method)이 있고, 태양광 인버터와 상용계통과의 통신을 통해서 단독운전을 방지하는 원격방식 (Remote AIM)이 존재한다. 이 중, 가격적인 부분에서 유리하여 현재 대부분의 단독운전 방식은 지역적 방법으로 구성되고 있으며, 이를 바탕으로 전 세계 각국에서는 지역적 단독운전 방지 방법에 대한 규정을 두고 있다¹⁾.

지역적 방식은 태양광 인버터 내부에서 역률1 제어를 통해서, 주파수나 전압의 크기 변동을 통해 단독운전을 검출하는 수동적방식과, 역률 1제어를 하지 않고 각종 외란신호를 주입해서 주파수, 전압 등의 변동을 통해 단독운전을 검출하는 능동적 방식이 있다. 수동적 방식만으로는 단독운전 현상을 안전하게 검출하는 데 어려움이 있어, 대부분 능동적 방식의 단독운전 검출 방식이 사용되고 있다. 이에 대한 연구는 주로 한 대의 태양광 발전 시스템을 기준으로 진행되어 왔고, 관련한 규정도 한 대의 태양광 시스템을 기준으로 규제가 진행되어 왔다¹⁾.

하지만, 최근 들어 태양광 발전 시스템의 설비 보급화에 의해, 새로운 형태의 단독운전 현상에 대한 우려가 대두되고 있다. 즉, 비록 한 대 기준으로는 단독운전 검출 성능을 만족하더라도, 여러 대가 교류 병렬화 되면, 단독운전 검출을 하지 못하는 현상이 발생하는 것이다²⁾. 이에, 본 논문에서는 4대의 3상 태양광 발전용 전력변환장치를 기준으로, 각각의 단독운전

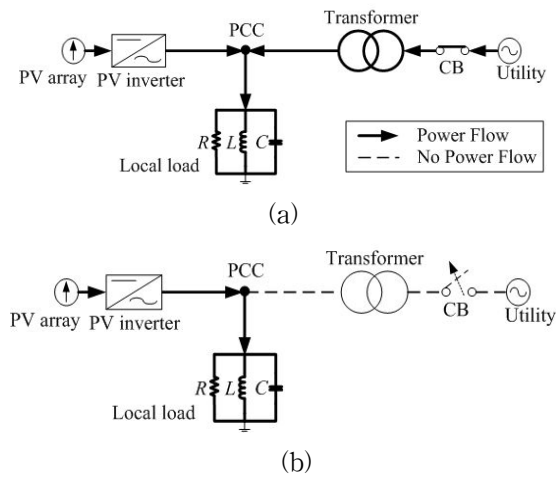


Fig. 1 Typical grid connected PV system configuration. (a) grid-connected case. (b) islanding phenomenon case.

검출 성능과 서로 병렬운전 했을 때의 단독운전 검출 성능을 서로 비교, 분석하여 병렬운전 되는 태양광 발전용 전력변환 장치의 단독운전 검출성능 고도화가 필요함을 도출하고 자 한다.

2. 단독운전 검출 시험 방법

단독운전 검출을 위한 성능 검토 기준으로 국내외로 많은 기준들이 제정되어 시행되고 있다. 대표적인 국제기준으로 IEC Std. 62116³⁾, IEEE Std. 1547⁴⁾, IEEE Std. 929⁵⁾ 등이 있고, 이 외에 한국에서는 PV 502⁶⁾ 이라는 태양광 발전용 전력변환장치의 기준이 마련되어 시행되고 있다. 이러한 기준의 가장 두드러진 차이점은 단독운전이 발생할 조건을 만드는 핵심 부하인, Fig. 2의 지역 저항 부하 R , 지역 유도성 부하 L , 지역 용량성 부하 C 를 어떻게 정하느냐에 따라 달라진다. 이 때 정해지는 L 과 C 의 값의 크기에 따라, 지역부하에서 발생하는 공진의 세기가 결정되며, 이러한 공진의 세기가 강할수록 단독운전은 검출하기가 어려

워 진다. 이 때 공진의 세기를 결정짓는 파라미터로 공진지수(Quality Factor) Q_f 를 다음 식과 같이 정의하게 된다.

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\sqrt{Q_L \times Q_C}}{P_I} \quad (1)$$

IEEE Std. 929은 공진지수를 2.5로 높은 편이지만, 그 외 IEC Std. 62116, IEEE Std. 1547, 그리고 한국의 PV 502의 경우에는 공진지수를 1로 규정하고, 단독운전 시험을 시행하고 있다. 본 논문에서는 IEC 62116을 기준으로 하여, 공진지수 1로 실험을 진행한다.

Fig. 2와 Fig. 3과 같이 태양광 어레이시뮬레이터(PV array simulator), 태양광 인버터(PV inverter), 상용계통 시뮬레이터(Simulated utility source), R, L, C 지역부하(local load)로 구성되는 시험 설비를 이용해서, 계통연계형 태양광 전력변환장치의 단독운전 검출 시험을 실시한다. 이 때 사용되는 태양광 발전용 인버터는 시중에 시판되는 상용 인버터 2종류, 총 4대를 사용해서 실험을 진행한다. 이 때 시험에 사용된 상용 제품 태양광 인버터의 주요 사양은 Table 1과 같다.

태양광 인버터를 정격 출력 전력으로 운전시키고, 이 때 IEC 기준에 부합하는 지역 부하 소자의 값 R, L, C 의 값은 다음 식으로부터 유도된다.

$$Q_L = Q_C = P_I \times Q_f \quad (2)$$

$$L = \frac{V^2}{2\pi \times f \times Q_L} \quad (3)$$

$$C = \frac{Q_C}{2\pi \times f \times V^2} \quad (4)$$

$$R = Q_f \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

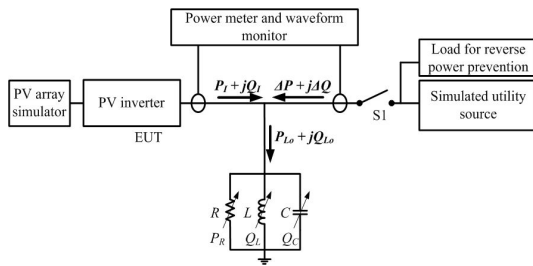


Fig. 2 Test equipment configuration for anti-islanding function

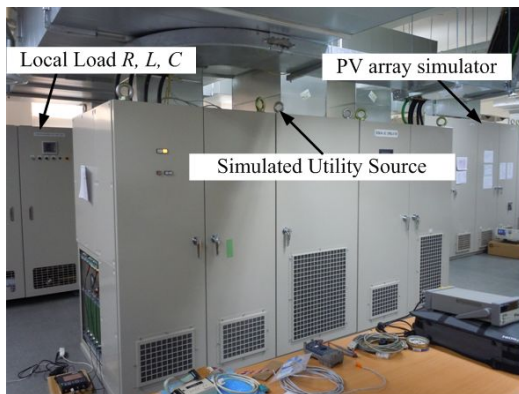


Fig. 3 Front view of testing equipments

Table. 1 Equipments under test

제조사	“A” (국내)	“B” (국외)
정격 출력	10 kW	16.5 kW
절연방식	상용주파 절연변압기	비절연
출력전압	380V, 60Hz	380V, 60Hz
상수	3상 4선식	3상 4선식

위 수식 (2)에서 (5)까지 구한, 지역부하 R , L , C 으로부터, 최종적으로 계통 유입유효전력 ΔP 와 계통 유입 무효전력 ΔQ 의 값이 0이 되도록 L 과 C 를 미소 조정한다. 만일 이 값들이 0이 되면, 계통 연계 스위치 $S1$ 의 개방 (open)하여 계통을 정전 시킨다. 이후, 연계된 태양광 인버터 시스템이 상용계통의 정전

을 검출하여, 단독운전이 방지하는지를 실험하게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

IEC 62116 국제 시험 규격에 따라, 2종류의 태양광 인버터를 다음의 시나리오를 가지고, 실험을 수행하였다. 1) 각각 한 대씩만을 단독 운전 시험을 수행하고, 2) 같은 종류의 태양광 전력변환장치가 2대씩 운전할 때 각각 단독운전을 시험하며, 3) 같은 종류 2대와 다른 종류 1대로 시험하며, 4) 마지막으로 같은 종류 2대와 다른 종류 2대로 단독운전 시험을 수행한다. 총 7가지의 실험 시나리오가 도출된다.

3.1 단일 인버터의 단독운전실험 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 A사 및 B사 태양광 인버터의 단일 운전 시 단독운전 검출시험 결과 파형을 나타내고 있으며, 그림에서 (a)는 계통전압, (b)는 태양광 인버터 출력전압의 주파수, (c)는 태양광 인버터 출력전압, (d)는 태양광 인버터의 출력전류를 의미한다.

Fig. 4에서처럼, A사 10kW 태양광 인버터의 단독운전 검출 방법은 단독운전이 발생하면, 주파수를 정제환시켜 주파수가 UFR(Under Frequency Relay)의 설정값을 벗어나면 단독운전을 검출하는 방식을 사용하였다. Fig. 5에서처럼 B사 16.5kW 태양광 인버터의 경우에는 주파수를 주기적으로 공칭주파수 대비 흔들어, 이 흔들어지는 값이 제어명령과 일치하는 기간이 길어지면 단독운전을 검출하는 방식을 사용하였다.

IEC 62116 국제 기준에 의하면, 단독운전 검출은 2초 이내로 완료되도록 권고하고 있고, 국내 태양광 인버터 인증기준 PV 502에 의하면 0.5초 이내로 검출 시간이 지정되어 있

다. 국내에서 제작된 A사 10kW 태양광 인버터의 경우, 단독운전 검출 시간은 Fig. 4에서 처럼 0.3초로 국내/외 규격 검출 시간 이내로

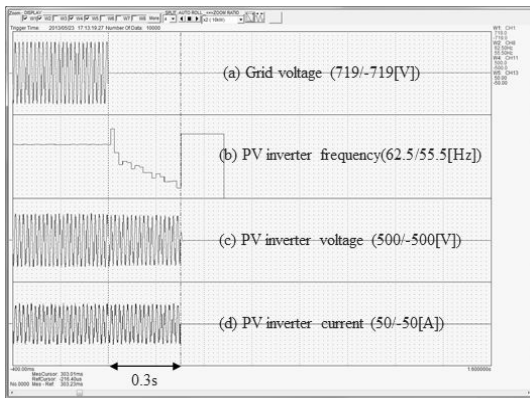


Fig. 4 Islanding test result for single 10kW PV inverter A

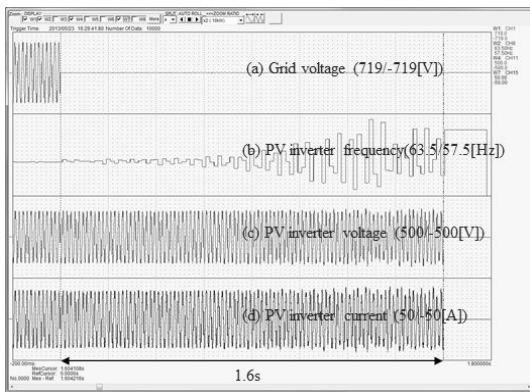


Fig. 5 Islanding test result for single 16.5kW PV inverter B

단독운전을 검출함을 알 수 있다. 반면에 해외 제품인 B사의 16.5kW 태양광 인버터의 경우는 단독운전 검출 시간이 1.6초로써, 국내 PV 502 기준에는 부합하지 않지만, IEC 62116에는 부합함을 알 수 있었다.

3.2 병렬운전시의 단독운전실험 결과

병렬운전시 단독운전 검출실험은 각 사의 제품 2대를 조합하여 실험이 진행되었다.

첫 번째 병렬운전 실험으로 Fig. 6과 Fig. 7에서처럼 A사, B사 각사의 제품을 동일 종류로 2대 병렬 운전시켰을 때, 그 검출 결과를 나타내고 있다. Fig. 6에서 (a)는 계통전압, (b)는 태양광 인버터 출력전압의 주파수, (c)는 태양광 인버터 출력전압, (d)는 2대의

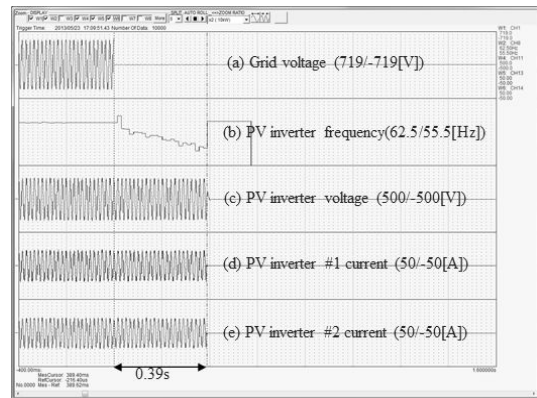


Fig. 6 Islanding test result for two 10kW PV "A" inverters

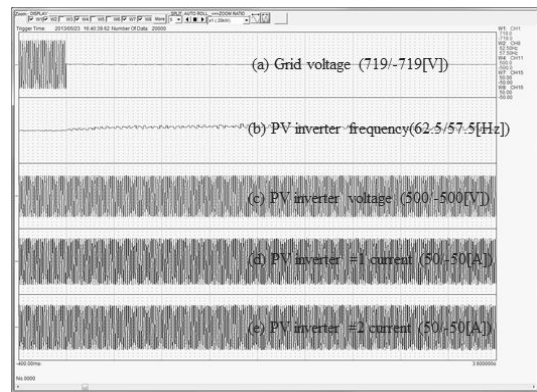


Fig. 7 Islanding test result for two 16.5kW PV "B" inverters

A사 태양광 인버터 중 1대의 출력전류이고, (e)는 나머지 1대의 출력전류이다. 마찬가지로, Fig. 7에서 (a)는 계통전압, (b)는 태양광 인버터 출력전압의 주파수, (c)는 태양광 인버터 출력전압, (d)와 (e)는 B사의 2대의 태양광 인버터 출력전류를 각각 나타낸 것이다. 단일

종류로 2대의 태양광 인버터를 병렬운전시켰을 때, 는 A사 제품과 같이 주파수를 정제환시키는 단독운전 검출방식은 Fig. 4와 같이 단일 운전할 때와 동일한 수준으로 0.39초 이내에 정지하였다. 하지만, B사 제품과 같이 주파수를 주기적으로 양/음으로 변동시키는 단독운전 검출방식은 2초가 넘도록 단독운전을 검출하지 못하였다. 특히, Fig. 7에 나타난 바와 같이, 주파수의 변동이 Fig. 5와 같이 단일로 운전할 때에 비하여 변동폭이 상당히 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 서로 단독운전 검출 신호를

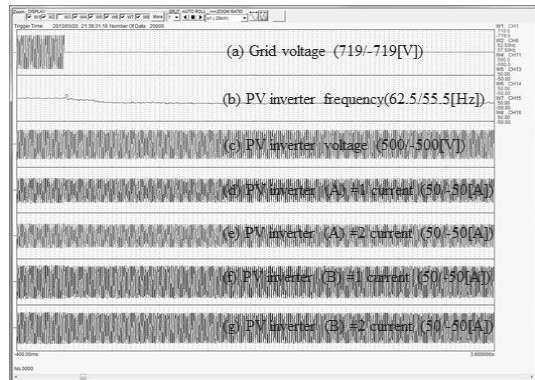


Fig. 10 Islanding test result for two 10kW PV "A" inverters and two 16.5kW PV "B" inverters

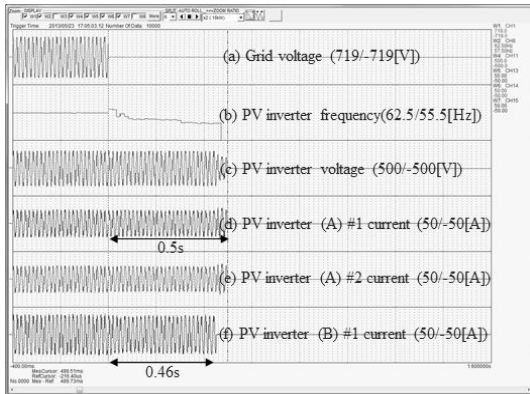


Fig. 8 Islanding test result for two 10kW PV "A" inverters and single 16.5kW PV "B" inverter

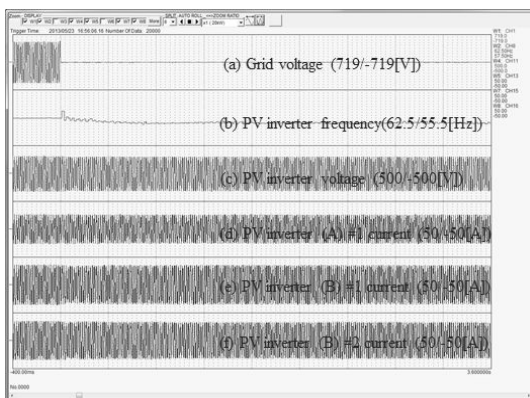


Fig. 9 Islanding test result for single 10kW PV "A" inverter and two 16.5kW PV "B" inverters

서로 상쇄하였기 때문에 주파수 변동의 크기가 감소된 것이다.

Fig. 8은 주파수 정제환 방식의 A제품 2대와 주기적 주파수 변동방식 B사 제품 1대가 병렬운전했을 때의 단독운전 검출 실험결과이다. 또, Fig. 9는 A제품 1대와 B사 제품 2대가 병렬운전 했을 때의 단독운전 검출 성능이다. Fig. 8과 Fig 9의 실험 결과 파형에서처럼, 단독운전 발생 후 주파수의 감속효과가 현저히 낮아진다. 특히, Fig. 8의 경우 59.03 Hz까지 감속된 후 B사는 0.46초, A사는 0.5초에 정지하였다. 즉, 서로 다른 기법 특히 주파수가 교번하여 변동하는 기법이 적용된 PCS와 병렬운전되는 경우 단독운전 검출기능이 현저히 저하되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 A사 1대, B사 2대의 시험결과, 단독운전 발생 후 주파수의 감속효과가 현저히 낮아지고 최소 59.55 Hz까지만 감속될 뿐 단독운전을 지속하였으며, 강제로 정지하기 전까지 단독운전이 지속되는 현상을 보였다.

Fig. 10은 A사 2대, B사 2대, 모두 4대를 전부 병렬 운전한 경우의 실험결과를 보이고 있으며, Fig. 9의 시험결과와 유사한 형태를 보여 강제로 정지하기까지 단독운전이 지속함을

알 수 있다. 즉, 병렬운전시 단독운전 검출 성능은 같이 운전하는 다른 태양광 인버터의 단독운전 검출 신호 혹은 전력에 의해 서로 간섭효과가 발생하여 단독운전 검출 성능이 현저히 저하됨을 실험을 통해서 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 다수대 태양광 인버터의 병렬운전 시 단독운전 검출시험을 통하여 검출 성능의 저하를 확인하였다. 동일기법이 적용된 태양광 인버터일지라도 병렬운전 시 단독운전 성능저하가 나타날 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다. 특히 서로 다른 기법이 적용된 태양광 인버터의 병렬운전 시 매우 심각한 성능저하가 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서, 이와 같은 병렬운전 시의 단독운전 검출기법의 신규 개발 및 이를 검증하기 위한 규격개정을 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20123010010060)

참 고 문 헌

1. L. A. C. Lopes and H. Sun, "Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 21, no. 1, pp. 171 - 180, Mar. 2006.
2. B. Yu, M. Matsui, and G. Yu, "A review of current anti-islanding methods for photovoltaic power system", Solar Energy, Vol. 84, pp. 745-754, 2010.
3. Test procedure of islanding prevention measures

for utility interconnected photovoltaic inverters, IEC Std. 62116 Ed. 1.0, Sept. 2008. ISBN 2-8318-1001-6.

4. IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.1-2005, Jul. 2005. ISBN 0-7381-4736-2 SH95346.
5. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems, IEEE Std. 929-2000, Jan. 2000. ISBN 0-7381-1934-2 SH94811.
6. Test procedure for grid-connected photovoltaic inverter, KEMCO, PV 502, 2012.