

태양광 발전과 ESS 시스템의 연계운전시 단독운전 방지 사례 연구

임종록* · 황혜미** · 신우균* · 주영철** · 정영석** · 강기환*** · 고석환****

*한국에너지기술연구원 신재생에너지연구소 태양광 연구실, 연구원
**한국에너지기술연구원 신재생에너지연구소 태양광 연구실, 선임연구원
***한국에너지기술연구원 신재생에너지연구소 태양광 연구실, 책임연구원

A Case Study on the Islanding Detection Protection of PV System and ESS System

Jong Rok Lim* · Hye-Mi Hwang** · Woo Gyun Shin* · Young-Chul Ju** · Young Seok Jung** · Gi-Hwan Kang*** · Suk-Whan Ko****

*Photovoltaics Laboratory, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research, Researcher
**Photovoltaics Laboratory, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research, Senior Researcher
***Photovoltaics Laboratory, New and Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research, Principal Researcher

†Corresponding author: korea19@kier.re.kr

Abstract

BIPV or BAPV installation applied to building is increasing through public utility mandates enterprise. Solar PV energy generates only during the day, but if it is operated in convergence with ESS, which stores electrical energy, it can restrain the fossil energy used in buildings throughout the day. A solution is to converge with PV system and ESS. However, PV systems and ESS connected to the power grid in parallel can cause problems of electrical stability. A study was conducted on the case of failure to detect islanding operation under the parallel operation of PV generation and ESS that are connected in parallel to power grid. Experiments conducted various non-islanding detections under the operating conditions. In the experiment results, when one PCS - PV inverter or ESS inverter - was operating under the islanding condition, it stopped working within 0.5 seconds of the Korean grid standard. However, when both of PV inverter and ESS inverter were operating at the same time under the islanding situation, the anti-islanding algorithm did not operate normally and both inverters continuously supplied power to the connected RLC loads. islanding detection Algorithm developed by each inverter manufacturer has caused this phenomenon. Therefore, this paper presented a new test standard for islanding detection.

Keywords: 태양광 발전 시스템(Photovoltaic system), 에너지 저장 시스템(ESS system), 단독 운전 검출(Islanding detection)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.1, pp.59-66, February 2019
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.1.059>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 03 January 2019

Revised: 19 February 2019

Accepted: 20 February 2019

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.

1. 서론

온실가스에 의한 지구의 온도 상승이 지속되고 있으며, 이에 따라 국제 사회는 온실가스 감축을 위해 끊임없는 노력을 하고 있다. 우리나라도 국제 사회의 요구에 발맞춰 2030년까지 BAU(Business As usual) 대비 37(%)를 감축하는 국가 온실가스 감축 목표를 위해 지속적인 노력을 하고 있으며, 최근 정부에서 발표한 “2030년 국가 온실가스 감축 목표 달성 위한 로드맵”에서는 기존 건축물의 설비 효율 개선 및 신재생에너지 보급 확대를 통해 15.2백만 톤의 온실가스를 감축하고자 하고 있다¹⁾. 이에 따라 “3020 재생에너지 이행 계획”을 위한 재생에너지 지원 사업을 통해 주택과 건물 재생에너지의 보급을 확대하고 있다. 또한 2020년 공공건축물의 제로에너지 건물 의무화, 2025년 모든 건축물의 제로에너지 건물 의무화 규정에 따라 건축물에 신재생에너지의 적용은 필수적이다. 재생에너지에는 태양광 발전, 바이오매스, 풍력, 연료전지 등이 있으나 건물 부분에서만 2030년까지 약 32.7[%]의 온실가스를 감축하기 위해서는 설치가 쉬우며 유지 보수가 간편한 태양광 발전의 역할이 가장 크다¹⁾.

건물에 적용되어 발전하는 태양광 발전 시스템의 형태는 크게 건물 일체형 태양광 발전시스템(BIPV)과 건물 부착형 태양광 발전(BAPV)으로 나눌 수 있으며, 이는 태양광 시스템을 건물에 설치하여 전기를 생산할 수 있을 뿐만 아니라 건물의 외장재를 대체 할 수 있는 장점이 있다²⁻⁴⁾. 하지만 태양광 시스템과 같은 재생에너지를 통한 전력 수급은 환경적 요인을 많이 받기 때문에 일정한 공급이 어려운 단점이 있다. 이런 문제를 줄이기 위해서 최근에 태양광 발전 시스템과 에너지 저장 장치(ESS)를 연계하여 최대 수요 전력 감소, 분산 전원의 출력 변동 상쇄, 전력 예비력 등 계통 안정성 및 효율 향상을 위한 효과적인 수단으로 사용하고 있다^{5,6)}. 태양광 발전시스템에 ESS를 연계하여 운전할 때는 수용가 및 계통에 피해를 주지 않도록 과도현상 보호, 전압 변동 범위 등 여러 가지를 고려해야 한다. 특히 단독운전 상황이 발생할 경우, 상용 계통의 전력 품질 뿐만 아니라 감전사고 문제가 발생할 수 있다^{7,8)}.

건물에 설치하는 태양광 발전 시스템은 대규모 집중형 전원과 다르게 전력 소비가 있는 지역 근처에 배치되는 소규모 분산형 발전 설비이다. 건물에 설치하는 태양광 발전 시스템은 주거지역 또는 생활환경과 동일한 공간에 있기 때문에 전기적인 출력뿐만 아니라 심미성을 고려해야 하며,⁹⁾ 특히 건물에 설치하기 때문에 물리적인 안전뿐만 아니라 전기적인 안전을 최우선으로 생각해야 한다. 그러므로 태양광시스템과 ESS 시스템이 계통에 연계되는 경우에도 ‘분산전원의 단독운전’ 현상을 반드시 고려해야 한다. 단독운전은 분산전원이 연계된 상용계통에 정전이 발생하였음에도 불구하고, 분산전원이 지속적으로 발전하여 계통에 전력을 공급하는 현상이다¹⁰⁾. 건물 일체형 태양광 시스템의 단독운전 발생은 계통상에서 인명피해를 야기 할 수 있으며, 복전 시 분산전원의 계통 비동기 접속으로 인한 설비 손상이 발생할 우려가 있다. 하지만 ESS 시스템과 태양광 시스템이 계통에 연계된 상태에서의 단독운전 검출 시험에 대한 연구는 진행되고 있지 않다. 이에 본 논문에서는 ESS 인버터와 태양광 발전 인버터가 동시에 운전되는 상황을 가정하여 계통 전원 정전시 단독운전 가능성에 대한 실험 및 분석을 실시하였다.

2. 태양광 시스템과 ESS 시스템의 병렬 운전시 단독운전 검출 실험 방법

태양광 발전은 태양전지 모듈과 어레이, 인버터, 간선을 포함하며, 태양광 시스템의 출력은 전류원으로 동작하여 계통과 서로 병렬로 연계되어 동위상 및 동일 주파수의 정현파 전류를 공급한다. 계통에서 전력이 차단되면 단독운전 상황이 발생하는데, 단독운전 현상은 계통 전압이 상실된 이후에도 분산전원이 병렬로 연결된 부하에 지속적으로 전력 공급을 하는 현상을 의미한다.

일반적으로 ESS 인버터는 충전 mode로 운전될 때, 단독운전 상황이 발생하지 않으므로 단독운전 알고리즘을 적용할 필요가 없다. 그러나 태양광 시스템과 계통연계 되어 병렬 운전되는 ESS 시스템 인버터는 태양광 시스템으로부터 발전에너지를 충전할 경우 전력 계통으로부터 회로가 분리 되더라도 지속적으로 운전 할 수 있는 상황이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 현상을 가정하여 병렬 계통 연계 상태에서의 단독운전 검출 실험을 위해서 300 [kW] 태양광 전력변환기기 시험설비와 250 [kW] ESS 시스템을 병렬로 연결하여 실험을 하였으며, ESS는 충전과 방전 상황으로 나누어 실험을 실시하였다. 3상 계통 연계형 인버터의 출력은 3상 평형이므로, 계측 파형의 측정은 3상 회로 중 U상의 전압, 주파수 및 전류 파형을 측정하였으며, 연계점 유무효 전력의 차(ΔP , ΔQ)는 각각 0 [%]로 하였다. 즉, Power Quality Factor가 1인 조건에 대하여 시험평가를 하였으며, 단독운전 검출 시험을 위한 회로 구성도는 Fig. 1과 같다. ESS 인버터와 태양광 인버터가 병렬로 연결되어 있으며, EUT 1은 태양광 인버터, EUT 2는 ESS 인버터를 의미한다.

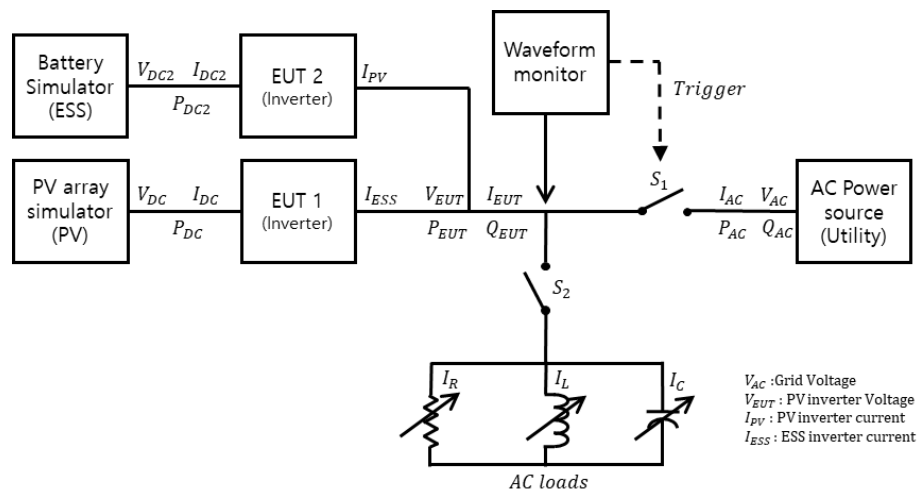


Fig. 1 Configuration diagram for islanding detect test

실험은 계통 측 차단기(S_1)를 OFF 한 후 태양광 및 ESS 인버터 측의 전압과 전류, 계통 측 전압 파형을 측정하여 한국의 Grid code 기준인 0.5 [Sec] 이내에 인버터가 정상적으로 정지되는지를 확인하였다. 단독운전 검출 실험에서 태양광 시스템의 용량은 20 [kW]로 하였으며, R 부하의 용량을 0 [kW], 10 [kW], 20 [kW], 40 [kW]

등으로 나누어 실험을 하였다. 먼저 태양광과 ESS 인버터의 개별 운전시 단독운전 검출 시험을 실시하여 각각 인버터의 단독운전 검출 상태를 확인 하였으며, 그 후에 2대의 인버터가 병렬로 연결된 상태에서의 몇 가지 상황으로 나누어 단독운전 검출 특성을 확인하였다. 실험에 사용된 2대의 인버터는 한국에서 상용으로 설치가 되고 있는 제품으로 주요사양은 Table 1과 같으며, Table 2는 시험에 따른 인버터의 동작 및 부하 투입 용량을 나타낸다.

Table 1 Specification of test inverters

Manufacture	A	B
Electrical connection	3phase 4wires	3phase 4wires
Norminal power	20 [kW]	50 [kW]
Input/output voltage	DC : 300-600 [Vdc], AC: 380 [Vac]	DC : 600-1000 [Vdc], AC: 380 [Vac]
Isolation type	Transformer type	Transformer-less type
Usage	Photovoltaic inverter	ESS inverter

Table 2 The description of test case for inverter output and load capacity

Case	Test conditions	Remarks
1	PV inverter operated at 20kW, ESS inverter off	RLC load Capacity 20 [kW], 20 [kVar]
2	PV inverter off, ESS inverter operated at 20kW(discharge mode)	RLC load Capacity 20 [kW], 20 [kVar]
3	PV inverter operated at 20kW, ESS inverter operated at 20kW(discharge mode)	RLC load Capacity 40 [kW], 40 [kVar]
4	PV inverter operated at 20kW, ESS inverter operated at 20kW(charge mode)	RLC load Capacity 0 [kW], 20 [kVar]
5	PV inverter operated at 20kW, ESS inverter operated at 10kW(charge mode)	RLC load Capacity 10 [kW], 20 [kVar]
6	PV inverter operated at 20kW, ESS inverter operated at 5kW(charge mode)	RLC load Capacity 15 [kW], 20 [kVar]

3. 실험 결과

3.1 개별 시스템의 단독운전 검출 실험

Fig. 2는 Table 2의 Case 1과 2에 대한 시험 결과를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 태양광 인버터만 20 [kW] 정격상태로 운전되는 상태에서 R 부하 20 [kW], L 부하 -20 [kVA], C 부하 20 [kVA]를 투입한 상황에서 계통 측 스위치를 차단하고 시험용 태양광 인버터가 정지되는 시간까지 측정된 스코프의 파형을 나타낸다. 그림에서 (A)는 선간전압, (B)는 개별 인버터의 전압, (C)는 개별 인버터의 전류, 그리고 (D)는 인버터측 주파수를 나타낸다. 계통 측의 전원이 차단된 이후 인버터가 정지하기 까지 267.5 [ms] 의 시간이 소요되어, 한국의 차단기준인 0.5초 이내에 정상적으로 인버터가 정지되었다. 태양광 인버터의 단독운전 검출 방법은 단독운전 발생 이전 주파수 59.9 [Hz]에서 1주기 후 0.35 [Hz]로 상승 이후 1~2 주기마다 주파수를 저감 시켜 차단하는 주파수 검출 기법을 사용하는 것으로 사료된다. Fig. 2의 (b)는 ESS 인버터만 20 [kW] 방전 운전 실시한 후 단독운전 상태로 부하를 투입하였다. 이후 계통 측 스위치를 차단 한 이후 인버터가 정지할 때까지 시간을 측정하였다. 소요시간

은 300.0 [ms]로 정상적으로 인버터가 정지되었다. ESS 인버터의 경우 단독운전이 발생된 후 특정주기마다 무효전력을 주입하여 주파수가 변화되는지를 검출하는 검출기법을 사용하였다. 실험 결과에서 무효전력 주입 주기는 약 300 [ms]로 추정이 되었다.

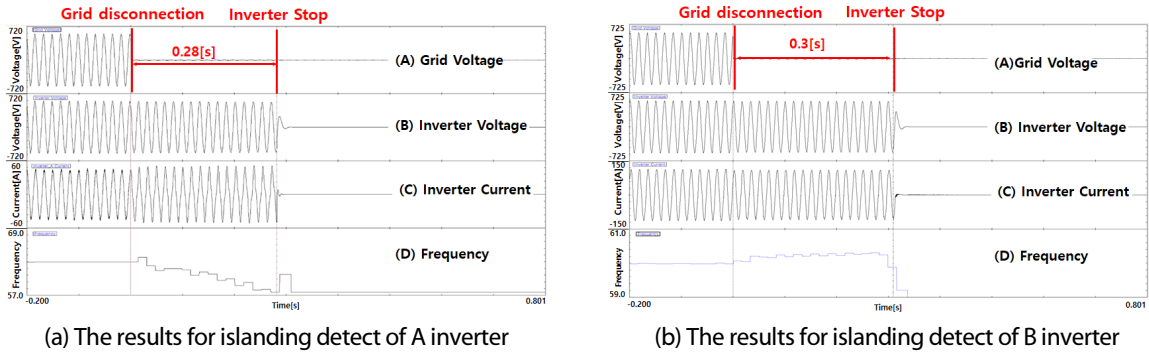


Fig. 2 The test results for islanding detect of one inverter

3.2 2개 시스템의 병렬운전 상태에서 단독운전 검출 시험

Fig. 3은 Case 3에 대한 실험 결과 파형이다. PV 인버터는 20 [kW]의 정격출력, ESS 인버터는 방전모드로 20 [kW] 운전하는 2대 병렬운전조건에서, R부하 40 [kW], L부하 -40 [kVA], C부하 40 [kVA]를 투입하여 단독운전 조건을 만들었다. 계통 측 차단기를 차단한 후 인버터가 정지되는 시간을 검출하고자 하였으나, 인버터 2대가 단독운전 검출을 실패하고 계속적으로 부하에 전원을 공급하는 상태로 운전을 계속하여 시스템들을 강제로 정지시켰다. Fig. 3의 주파수 파형에서 ESS 인버터의 단독운전 주파수 검출 주기인 약 350 [ms]마다 무효전력을 주입하여 주파수를 변동시켰으나, 주파수 변동량이 검출 주파수의 5[%]이내로 변동되어 단독운전 검출에 실패하였다. 동일한 단독운전 알고리즘이 적용된 인버터의 경우에는 단독운전 검출이 가능하지만 서로 다른 알고리즘이 적용된 인버터의 경우에는 Fig. 3과 같이 단독운전 검출이 불가능하다.

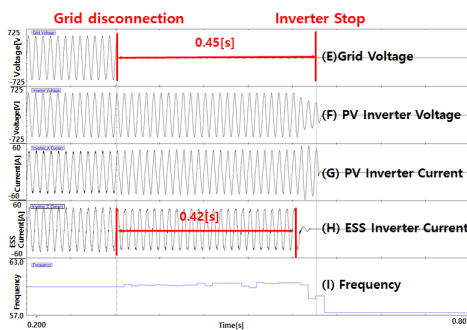


Fig. 3 The results for islanding detect of case 3 (R load capacity: 40 [kW])

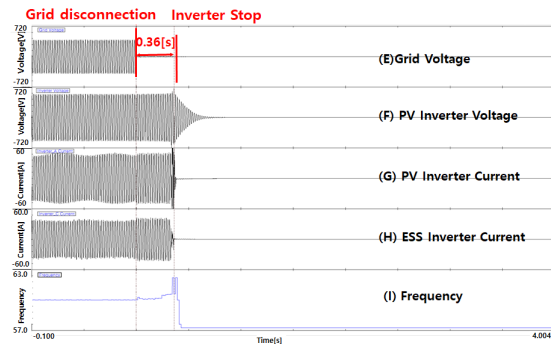


Fig. 4 The results for islanding detect of case 4 (R load capacity: 0 [kW])

그림에서 (E)는 선간전압, (F)는 태양광 인버터의 전압, (G)는 태양광 인버터의 전류, (H)는 ESS 시스템의 인버터 전류 그리고 (I)는 인버터 측 주파수를 나타낸다.

단독운전 검출에 실패한 이유는 인버터 제조사 별로 검출 알고리즘이 상이하여 다수가 병렬 운전되는 상황에서 주파수의 왜곡 또는 무효전력의 주입이 상쇄되어 검출이 불가능하였다. 인버터의 단독운전 검출 Gain값을 조정하여 Site에서 변경이 가능하지만, Gain 값이 클 경우 THD 또는 Flicker에 대한 영향이 발생할 수도 있다. 즉, 분산전원용 인버터가 다수 병렬로 운전되는 상황에서는 단독운전 검출이 가능한 알고리즘 개발이 필요하다.

Fig. 4는 태양광 인버터가 20 [kW] 정격출력 상태로 운전하고, ESS 인버터가 20 [kW] 충전모드로 운전되는 상태를 만들었다. R부하 0 [kW], L 부하 -20 [kVA], C부하 20 [kVA]를 투입하여 단독운전 상태에서 계통 측 차단기를 차단하고 인버터의 정지시간을 측정하였다. 시간은 357.5 [ms]로 정상적으로 단독운전을 검출하였다. 태양광 인버터의 출력량과 ESS 인버터의 충전 용량이 같은 경우에는 단독운전 검출이 가능했다.

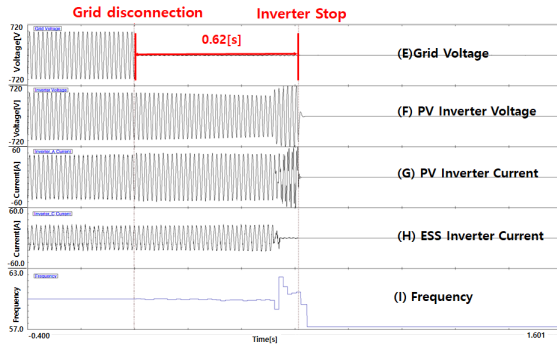


Fig. 5 The results for islanding detect of case 5 (R load capacity: 10 [kW])

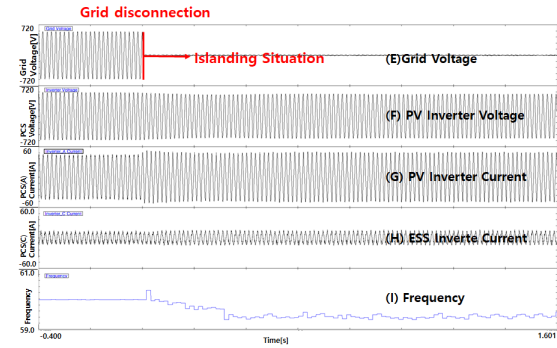


Fig. 6 The results for islanding detect of case 6 (R load capacity: 15 [kW])

Fig. 5는 태양광 인버터가 20 [kW] 정격운전하고, ESS 인버터가 충전모드로 10 [kW]로 운전하는 상태에서 단독운전 조건을 만들 운전을 하였다. R부하는 10 [kW], L부하는 -20 [kVA], C부하는 20 [kVA]를 투입하였다. 실험결과 인버터들은 3.197 [Sec]에 정지를 하였으나, 단독운전 검출 제한시간인 0.5 [Sec]를 넘어 단독운전 검출에 실패하였다. Fig. 6은 태양광 인버터가 20 [kW] 정격운전 상태에서 ESS 인버터를 5 [kW] 충전모드로 운전을 시켰다. R부하의 용량만 15 [kW] 조정하여 단독 운전 상태로 만들어 실험을 실시하였다. 실험결과 인버터가 지속적으로 운전되는 상태가 되어 강제적으로 인버터를 정지시켰다. ESS 인버터가 일부 충전모드로 운전되고 시스템 연계지점에서 R부하가 일부분 존재하는 상황에서 단독운전 검출이 불가능하다는 것을 본 실험을 통하여 확인하였다. Fig. 6의 주파수 파형은 단독운전 상황에서 검출 주파수가 기준 범위 안에서 계속적으로 바뀌며 운전되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광시스템과 ESS시스템이 동일한 연계지점에 연결되어 운전되는 상태에 대한 단독운전 검출 실험을 실시하였다. 인버터 1대에 대한 단독운전 검출시험에서는 안정적으로 단독운전을 검출하여 인버터가 정지가 되었다. 하지만 2대의 인버터가 동시에 운전이 되는 상태에서는 단독운전 검출을 못하고, 지속적으로 운전되는 현상이 발생하였다. ESS의 인버터는 충전모드에 운전할 때는 R(저항) 부하와 같이 동작됨에 따라 계통이 차단이 되었을 경우 단독운전 상황에 빠뜨릴 경우가 많아진다. ESS 인버터의 경우 제조사마다 다르겠지만, 충전상황에서 단독운전 알고리즘을 적용하지 않는 경우도 있어 단독운전 검출이 어려워 질 수도 있다. 단독운전 알고리즘으로 많이 적용되고 있는 주파수의 왜곡이나 무효전력 주입의 주기가 제조사별로 다르게 적용되어 단독운전 상황에서 기준치 이상의 주파수 변동이나 무효전력의 차이가 상쇄되어 검출에 실패하는 사례를 실험을 통해 확인하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제조사가 다른 인버터 2대를 병렬운전하고, 단독운전 상태를 모의하여 실험을 실시한 결과 단독운전 검출을 실패하고, 계속적으로 부하에 전원을 공급하였다. 제조사 별로 알고리즘이 주파수의 변동, 무효전력 주입 등과 같이 다르고, 단독운전 상황에서 주파수 변동량을 상쇄시키므로 검출이 실패되었다.
- (2) 태양광 인버터의 출력과 같은 용량으로 ESS 인버터가 충전되는 상황에서는 정상적으로 단독운전 검출이 되어 정지되었다. 또한 태양광 인버터의 출력량보다 작은 용량의 충전모드에서 운전되는 ESS 인버터가 단독운전 상태에서 단독운전 검출 시간이 수초 이상 진행되거나, 검출에 실패하였다.
- (3) ESS 인버터의 경우 기타 분산전원과 연계되어 운전 될 수 있으므로, 충전모드에서도 단독운전 검출 알고리즘이 적용되어야 한다.
- (4) 다수의 인버터가 연계되어 운전되는 조건에서 단독운전 검출 시험에 대한 표준 개발이 필요하다. 또한 다수의 인버터가 동작되는 상황에서도 단독운전 검출이 가능한 알고리즘의 표준화가 필요하다.

후기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부 신재생 표준화 및 인증기반 구축 사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : 71000145, 71000106).

REFERENCES

1. Basic road map for the Achievement of the 2030 Nation Greenhouse Gas Reduction Goal in the Korean
2. Choi, W. K., Oh, M. S., and Shin, W. C., The Simplified Pre-Estimation Model Development of a BIPV Generation Rate by the District Division, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 36, No. 2, pp. 19-29, 2016.
3. Park, J. W., Kim, H. K., Kim, T. Y., and Leigh, S. B., A Study on the Effect of Air Gap for Reducing the Temperature of Vertical Building Applied Photovoltaics through CFD Simulation, Journal of the Architectural

Institute of Korea Planning & Design, Vol. 28, No. 5, pp. 249-256, 2012.

4. Wu, X., Liu, Y., Xu, J., Lei, W., Si, X., Du, W., and Lin, J., Monitoring the Performance of the Building Attached Photovoltaic (BAPV) System in Shanghai, *Energy and buildings*, Vol. 88, pp. 174-182, 2015.
5. Husein, M., Hau, V. B., Chung, I. Y., Chae, W. K., and Lee, H. J., Design and Dynamic Performance Analysis of a Stand-alone Microgrid, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 12, No. 5, pp. 1777-1788, 2017.
6. Kim, J. Y., Jeon, J. H., Kim, S. K., Cho, C., Park, J. H., Kim, H. M., and Nam, K. Y., Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 3037-3048, 2010.
7. Verhoeven, Bas. Utility aspects of grid connected photovoltaic power systems. International Energy Agency, 1998.
8. Chung, I. -Y. and Moon, S. -I., A New Islanding Detection Method Using Phase-locked Loop for Inverter-interfaced Distributed Generators, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 165-171, 2007.
9. Zomer, C., Nobre, A., Cassatella, P., Reindl, T., and R  ther, R., The Balance between Aesthetics and Performance in Building-integrated Photovoltaics in the Tropics, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* Vol. 22, No. 7, pp. 744-756, 2014.
10. Choi, J. -S., Ko, J. -S., and Chung, D. -H., Development of Novel Algorithm for Anti-Islanding of Grid-Connected PV Inverter. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* Vol. 25, No. 10, pp. 76-86, 2011.