

# Slip-Mode Frequency Shift 단독운전 검출 기법의 정상상태 전력 품질 개선

## Design of Modified Slip-Mode Frequency Shift Islanding Detection Method for Power Quality Improvement

김 동 옥\*, 김 성 민\*

Dong-Uk Kim\*, Sungmin Kim\*

### Abstract

Grid-connected inverter is required to cut off the power supplied to the grid at the islanding condition, immediately. For this reason, an islanding detection is an indispensable function for grid-connected distributed generation system. Slip-Mode frequency Shift (SMS) islanding detection method is very popular method to determine the grid state. SMS method supplies the reactive power to the load according to the grid frequency. In the islanding condition of grid, this injected reactive power pulls out the grid frequency from the allowable range, then the inverter system can detect the islanding condition of the grid. The SMS method can detect the islanding state well and does not generate any harmonics of the grid current. However, the reactive power would be generated and the power quality is reduced even though the grid is not islanding condition, but normal condition. In this paper, a modified SMS method is proposed to remove the reactive power in the normal condition. The performance of the proposed method is evaluated by 600W single phase inverter experimental results.

### 요 약

계통 연계형 인버터는 단독운전 조건에서 반드시 전력 공급을 차단해야 한다. 이러한 이유로 분산 발전 시스템은 단독운전을 검출 기능을 반드시 가지고 있어야 한다. 분산 발전용 인버터에 적용되는 일반적인 방법 중에는 Slip-Mode frequency Shift (SMS) 단독운전 검출 기법이 있다. SMS 기법은 계통 전압의 주파수에 따라 무효 전력을 공급하여 단독운전 조건에서 계통 주파수를 허용 범위 밖으로 이동시키는 방법이다. SMS 기법은 안정적으로 단독운전을 검출할 수 있으며, 계통 전류에 고주파를 인가하지 않는다는 장점이 있으나, 무효 전류를 인가하기 때문에 계통 역률이 나빠져서 전력 품질의 저하를 가져온다. 본 논문에서는 계통 전원이 연결되어 있는 정상 조건에서 전력 품질 저하가 없는 수정된 SMS 기법을 제안한다. 600W 단상 인버터 실험을 통해 제안된 방법의 유효성을 검증한다.

*Key words : Anti-islanding Detection, Grid Connected Inverter, Non-Detection Zone, Slip Mode Frequency Shift, Power Quality*

---

Division of Electrical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus

★ Corresponding author

E-mail : ksminmoon@hanyang.ac.kr, Tel : +82-31-400-5172

※ Acknowledgment

This work was supported by the New & Renewable Energy Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea under Grant 20163030031830.

Manuscript received Jul. 17, 2018; revised Jul. 19, 2018; accepted Jul. 24, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

지구 온난화를 막고 석탄 에너지 고갈에 대한 준비를 해야 한다는 것은 우리나라뿐만 아니라 전 세계 모든 국가가 공감하는 문제이다. 위 두 가지를 동시에 해결하는 가장 좋은 방법은 신재생 에너지의 활용을 높이는 것이다. 실제로 독일은 독일 전체 전력량의 약 18%를 풍력 발전을 통해 얻고 있으며, 우리나라도 최근 태양광 발전이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 태양광과 풍력으로 대표되는 신재생 에너지원 사용의 증가는 소규모 분산 발전(Distributed Generation)이 전력 계통에 공급하는 전력량을 증가시킨다. 분산 발전은 연계되는 에너지원의 특성에 따라 다양한 특성을 가지게 된다. 이러한 분산 발전이 전력 계통에 공급하는 용량이 커질수록, 전력 계통의 안정적 운영에 있어서 여러 가지 문제를 발생시킬 가능성이 높다. 전력 계통의 안정적 전력 공급을 위해서 계통 운영자는 계통에 연계될 분산 발전에 다양한 규제를 제시하고 있다. 분산 발전원에 요구되는 다양한 규제 중에서 단독 운전 방지(Anti-Islanding)는 매우 중요하다. 계통에 전력을 공급하는 주 전원(Main Generation)이 사고 등 여러 가지 이유에 의해 계통에서 탈락되어 분산 전원만이 계통에 전력을 공급하는 계통 상태를 단독운전이라 한다. 전력 계통 측면에서 단독 운전은 몇 가지 위험한 문제를 야기한다. 계통의 주 전원이 회복되어서 다시 연결되기 위해서는 주 전원과 분산 전원의 위상을 맞추는 과정이 필요한데, 계통에 산재되어 있는 수많은 분산 전원의 위상을 주 전원에서 동기화하는 것은 불가능하다. 따라서, 단독운전 조건에서는 전력 계통의 주 전원 복구가 어렵다. 또 다른 중요한 문제는 계통 사고를 복구하는 과정에서 분산 전원이 계통에 지속적으로 전력을 공급하게 되면, 계통의 유지보수 인력이 위험에 노출된다는 것이다. 이러한 이유로 분산 발전은 계통의 단독운전 여부를 검출하여 전력 공급을 즉시 중단하는 기능을 반드시 갖추어야 한다.

계통의 단독운전 상태를 검출하기 위한 방법은 크게 계통 내장형 검출 기법(Grid-Resident Detection), 외부 스위치 캐패시터 검출 기법(External Switched Capacitor Detection), 인버터 내장형 검출 기법(Inverter-Resident Detection)으로 나눌 수 있다[1]. 계통 내장형 검출 기법은 계통 운영자가 별도의 통

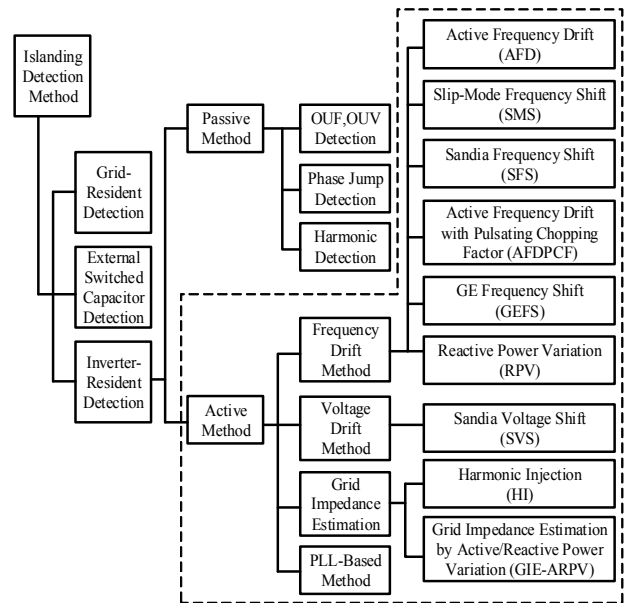


Fig. 1. Islanding detection methods.

그림 1. 단독운전 검출 기법의 종류

신망을 통해서 분산 전원에 계통의 상태 정보를 제공하거나, 계통의 전력선에 특정 신호를 인가하여 계통의 상태를 알려주는 방법이다. 가장 이상적인 방법이지만, 별도의 통신망을 구축해야 한다는 점 때문에 거대한 전력망에 구현하는 것은 거의 불가능하다. 외부 스위치 캐패시터 검출 기법은 분산 전원이 연결된 PCC(Point of Common Coupling)에 스위치가 연결된 캐패시터 뱅크를 병렬연결 하고, 사전에 약속된 패턴에 따라 스위치를 On/Off하여 동일 PCC에 연결된 분산 전원들이 계통 전원의 연결 유무를 판단할 수 있도록 한다. 이 방법은 소규모의 계통 내장형 검출 기법으로 생각할 수 있다. 그러나 PCC에 연결된 캐패시터의 운용 책임과 계통에 고조파 특성이 나빠진다는 단점으로 실제 계통에 적용하기에는 한계가 있다.

전력 계통에 종속되지 않으며 단독운전을 판단하기 위해서는 단독운전 검출 기능을 분산 전원의 인버터 자체가 가지고 있어야 한다. 이러한 단독운전 검출 기법을 인버터 내장형 검출 기법이라고 한다. 인버터 내장형 검출 기법은 크게 수동형 기법(Passive Method)와 능동형 기법(Active Method)로 나뉜다. 인버터 내장형 검출 기법의 수동형 기법은 전력 계통의 상태를 지속적으로 모니터링하여 단독운전을 판단한다. 계통 전압의 주파수와 크기가 허용 범위 밖에 위치하거나, 전압 위상의 급변, 계통 전류의 고조파 특성이 급변하는 것 등을 관찰하여

단독운전을 판단한다. 수동형 기법은 계통 전원의 품질에 영향을 미치지 않기 때문에 계통 독립적인 단독운전 검출 기법이지만, 계통의 부하 조건에 따라 단독운전 검출이 불가능한 영역(Non-Detection Zone, NDZ)이 존재한다는 단점이 있다.

인버터 내장형 검출 기법의 또 다른 방법으로 능동형 기법(Active Method)이 있다. 능동형 기법은 분산 전원의 계통 연계형 인버터가 전력 계통의 제정수에 변화를 발생시킬 수 있는 능동적인 동작을 통해서 단독운전을 판단하는 방법들이다. 능동형 기법들은 인버터에서 계통의 상태에 따라 반응을 하여 계통 전압의 주파수나 위상, 계통 전류의 고조파 특성, 유효 전력 혹은 무효 전력에 변화를 일으킨다. 계통의 전원이 연결되어 있는 정상 조건(Normal Condition)에서는 인버터의 능동적인 반응이 계통의 제정수에 영향을 미치지 못하지만, 단독운전 조건에서는 인버터의 능동적 반응으로 계통의 제정수가 크게 변하게 된다. 이러한 반응으로부터 계통의 단독운전 여부를 결정할 수 있다.

인버터 내장형 능동형 방법은 수동형 방법과 마찬가지로 단독운전 여부를 판단할 수 없는 NDZ가 존재한다. 그러나 수동형 방법에 비하여 NDZ의 범위가 상당히 작으며, 필요에 따라 NDZ를 기준에 맞게 설계할 수도 있다.

인버터 내장형 능동형 방법에는 계통에 인가하는 성분은 따라 여러 가지 기법들이 제안되어 왔다. 그 중에서 많은 능동형 기법들이 사용하고 있는 방법은 인버터의 출력 전압 주파수를 인위적으로 변동시켜 계통 전압의 주파수 반응을 보고 단독운전을 판단하는 것이다[2, 4]. 그림 1의 Active Frequency Drift(AFD), Sandia Frequency Shift(SFS), Active Frequency Drift with Pulsating Chopping Factor(AFDPCF) 기법 등은 출력 전압의 주파수를 인위적으로 증가시킨다. 이전 주기 전압의 주파수보다 높은 주파수의 출력 전류 파형을 출력하여 단독운전 조건에서 계통 전압 주파수가 지속적으로 증가하도록 한다. 이러한 방법들은 인버터의 출력 전류에 영전류 구간을 지속적으로 만들기 때문에 계통 전류 품질에 고조파가 발생하게 된다는 단점을 가지고 있다.

계통 전압의 주파수를 증가시키는 다른 방법으로는 계통의 무효 전력을 불일치시키는 방법이 있다. 분산 전원의 인버터가 임의의 무효 전력을 계통에 공급하게 되면 계통 전원이 계통에 연결되어 있는

정상 조건에서는 계통 전원이 인버터와 부하 간의 불일치되는 무효 전력을 흡수하기 때문에 계통 전압의 주파수에 변화가 없다. 단독운전 조건에서는 인버터가 공급하는 무효 전력을 부하에서 흡수해야 한다. 따라서 인버터가 공급한 무효 전력을 흡수할 수 있는 부하 특성이 되기 위해 계통의 주파수가 변동하게 된다. 이러한 원리를 사용하는 능동형 방법에는 Slip-Mode Frequency Shift(SMS), GE Frequency Shift(GEFS) 등이 있다[5]. SMS나 GEFS는 계통에 무효 전력을 인가하기 때문에 계통 전류에 고조파를 발생시키지는 않는다. 그러나 단독운전 검출을 위해 인가하는 무효 전력으로 인해 역률이 나빠진다는 단점을 가진다.

본 논문은 무효 전력을 인가하여 단독운전을 검출하는 Slip-Mode frequency Shift(SMS) 기법이 갖는 계통 역률이 저감되는 문제를 해결하기 위한 수정된 기법을 제안한다. 제안된 방법은 계통 전원이 계통에 연결되어 있는 정상 조건에서는 무효 전력을 발생시키지 않으며, 단독운전 조건에서는 무효 전력을 발생시켜 단독운전을 판단할 수 있다.

## II. Slip-Mode Frequency Shift 단독운전 검출 기법

### 1. 단독운전 검출 기능 시험

단독운전 검출에 대한 규정에는 대표적으로 IEEE 1547, IEC Standard 61727 이 있다[3]. 국내의 분산 발전원은 한전에서 제공하는 분산형 전원 배전 계통 연계 기술기준을 만족해야 하는데, 이는 IEEE 1547과 유사하다. 그림 2는 IEEE 1547에서 제시하는 단독운전 검출 기능 시험을 위한 시험 설비의 구조이다. 시험 설비는 시험 대상 인버터, 인버터와 시험 설비를 연결하는 차단기(SW1), RLC 부하, 교류 전압원(AC Power Supply), 교류 전압원과 RLC 부하를 연결하는 차단기(SW2)로 구성된다. 교류 전압원의 크기는 시험하고자 하는 인버터의 정격 전압에 맞추어 결정한다. RLC 부하의 저항은 인버터의 정격 전력을 소모하는 정격 부하로 결정한다. RLC 부하의 공진 주파수  $f_o$ 는 교류 전압원의 공칭 주파수로 결정하며, 그에 따라 부하의 Quality Factor( $Q_f$ )는 식 (1)과 같이 결정된다.

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

그림 3은 단독운전 기능 시험 절차를 나타내고 있으며, 각 단계별 순서는 다음과 같다.

가. 단독운전 기능 시험 1단계(Step #1)

(SW1 Open, SW2 Closed,  $I_g=I_{load}$ ,  $I_{inv}=0$ )

SW2를 Closed하여 교류 전압원이 RLC 부하에 연결된다. SW1이 Open되어, 인버터는 시험 설비에 연결되지 않는다. 이때, RLC 부하에 흐르는 전류는 교류 전압원에서 공급된다.

나. 단독운전 기능 시험 2단계(Step #2)

(SW1 Closed, SW2 Closed,  $I_g=0$ ,  $I_{inv}=I_{load}$ )

SW1을 연결한다. 이때, 인버터는 전류 제어를 시작하여, 부하에 정격 전력을 공급한다. 따라서 교류 전압원에는 전류가 흐르지 않게 된다.

다. 단독운전 기능 시험 3단계(Step #3)

(SW1 Closed, SW2 Open,  $I_g=0$ ,  $I_{inv}=I_{load}$ )

부하와 교류 전압원을 연결하는 SW2를 Open한다. 교류 전압원에서 부하로 공급되는 전력은 없으므로 교류 전압원이 차단되어도 부하에 흐르는 전류는 달라지지 않는다. 단독운전의 조건이 되며, 인버터는 단독운전 조건을 검출하여 인버터를 정지시킨다.

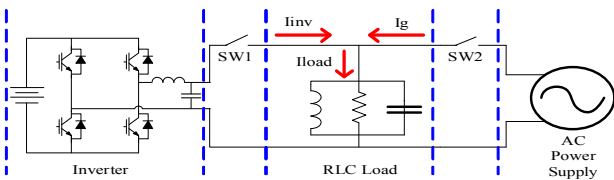


Fig. 2. Islanding detection test equipment.  
그림 2. 단독운전 검출 시험 설비 구성

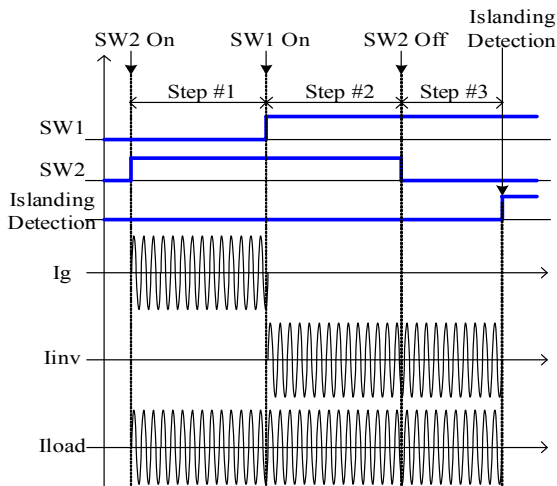


Fig. 3. Islanding detection test procedure.  
그림 3. 단독운전 검출 시험 절차

2. SMS 단독운전 검출

일반적인 분산 전원의 유효 전력은 에너지원의 상태에 따라 결정되기 때문에, 단독운전 검출을 위해 변화를 시킬 자유도가 크지 않다. 그러나 무효 전력은 분산 전원의 에너지원과 상관이 없으며, 전력 계통의 규제에 의해 제한된다. 전력 계통에서 무효 전력을 규제하는 이유는 전력 계통의 유효 전력 전달율을 높이기 위한 것으로, 약간의 무효 전력의 사용은 계통 운용에 필요한 것이라면 허용 가능하다.

계통에서 전원이 상실된 단독운전 조건에서는 분산 전원의 인버터가 만드는 유/무효 전력은 모두 부하에서 흡수된다. 부하에서 흡수하는 무효 전력은 부하에 걸리는 전압크기와 주파수에 의해 결정된다. 단독운전 조건에서 인버터의 무효 전력이 부하에서 흡수하는 무효 전력과 다르다면, 주파수가 변경되어 일치하도록 하게 된다.

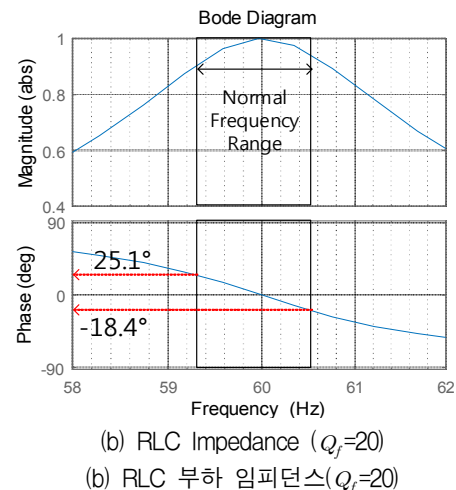
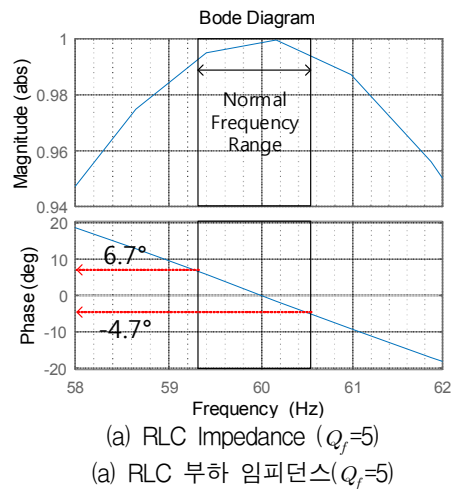


Fig. 4. Impedance characteristics of RLC Load.  
그림 4. RLC 부하의 주파수 임피던스 특성

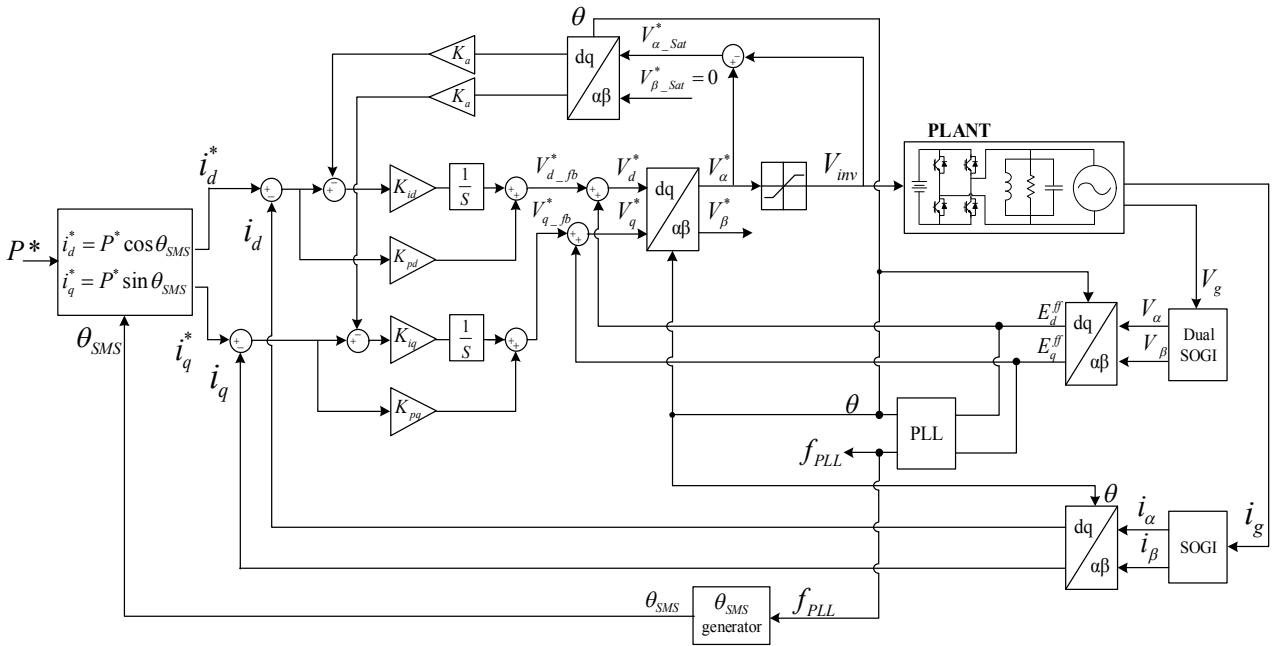
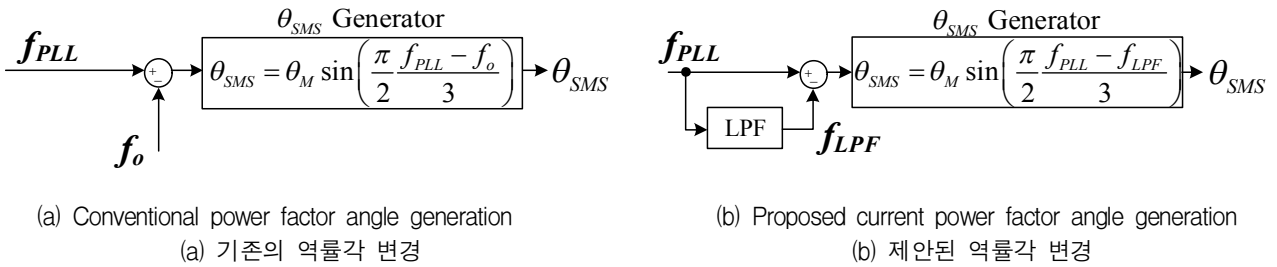


Fig. 5. Conventional slip-mode frequency shift Islanding detection method.

그림 5. 기존의 slip-mode frequency shift 단독운전 검출 방법



(a) Conventional power factor angle generation  
(a) 기존의 역률각 변경

(b) Proposed current power factor angle generation  
(b) 제안된 역률각 변경

Fig. 6. Power factor angle generation of SMS islanding detection method.

그림 6. SMS 단독운전 검출 기법의 역률각 결정 방법

단독운전 시험을 위한 병렬 RLC 부하의 주파수에 대한 임피던스 크기는 아래 식과 같다.

$$|Z_{RLC}| = \frac{1}{\left| \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right|} \quad (2)$$

RLC부하의 주파수에 대한 부하각은 아래 식과 같다.

$$\theta_{RLC} = \tan^{-1} \left( Q_f \left( \frac{f_o}{f} - \frac{f}{f_o} \right) \right) \quad (3)$$

그림 4는  $Q_f$ 가 5와 20일 때, RLC 부하의 임피던스 특성을 나타내고 있다.  $Q_f$ 가 5인 RLC 부하인 경우, 부하각이  $6.7^\circ$ 가 되면 주파수가 59.3 Hz가 되어 정상 범위를 벗어나게 된다. 단독운전 검출 기법이 59.3 Hz의 주파수에서 역률각이  $6.7^\circ$  이상이

되도록 제어한다면, 단독운전 조건에서 계통의 주파수가 59.3 Hz 이하로 떨어져서 단독운전을 판단할 수 있다.  $Q_f$ 가 20인 경우에는 59.3 Hz에서 부하각은  $25.1^\circ$ 까지 증가한다. 이러한 경우 SMS 단독운전 기법의 주파수가 59.3 Hz가 되었을 때 역률각을  $25.1^\circ$  이상이 되도록 무효 전력을 공급해야 한다. 그보다 작은 역률각으로 무효 전력을 공급하면 단독운전 조건에서 주파수는 59.3 Hz 보다 큰 정상 범위 안에 존재하게 되므로 단독운전을 판단할 수 없다. SMS 단독운전 기법과 같은 무효 전력을 주입하여 단독운전을 판단하는 방법은 역률각에 따라 단독운전을 판단할 수 없는 부하의 조건이 존재하게 된다. 이러한 단독운전 검출이 불가능한 영역을 Non-Detection Zone (NDZ)이라고 칭한다.

### 3. 기존 SMS 단독운전 기법의 구현

그림 5는 동기 좌표계 상에서 Proportional Integral (PI) 제어기를 사용한 단상 계통 연계형 인버터의 전류 제어기의 구성도이다. 측정된 계통 전압( $V_g$ )을 입력으로 받은 Phase Lock Loop(PLL)은 계통 전압의 주파수와 위상을 추출한다. 단상 계통 시스템이기 때문에 PLL에 필요한 90도 위상 앞선 신호는 Dual Second Order Generalized Integrator(Dual-SOGI)를 통하여 만든다. 유효 전류는 d축에 위치하고, 무효 전류는 q축에 위치하도록 계통 위상각을 결정하였다[6].

SMS 단독운전 기법을 구현하기 위해서 전류 지령의 위상을 계통 전압 주파수에 따라 변경하도록 해야 한다. 전류 지령은 분산 전원 인버터의 유효 전력 지령과 SMS 단독운전 기법이 결정하는 역률각( $\theta_{SMS}$ )에 의해 아래 식과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} i_d^* &= P^* \cos(\theta_{SMS}) \\ i_q^* &= P^* \sin(\theta_{SMS}) \end{aligned} \quad (4)$$

SMS 단독운전 기법이 결정하는 역률각( $\theta_{SMS}$ )은 식 (5)과 같이 설계된다.

$$\theta_{SMS} = \theta_M \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_{PLL} - f_o}{f_\Delta}\right) \quad (5)$$

이때,  $\theta_M$ 은 계통 주파수에 대해서 가변하는 역률각인  $\theta_{SMS}$ 의 최댓값으로 설계한다.  $f_{PLL}$ 은 추정된 주파수이며,  $f_o$ 는 계통 전압의 공칭 주파수이다.  $f_\Delta$ 는  $\theta_{SMS}$  값이 최대가 될 때의 주파수 변화이다. 보통 3Hz로 설정되는데 더 빠른 역률각 변화를 인가하기 위해서  $f_\Delta$  값의 조정이 가능하다.

## III. 제안하는 SMS 단독운전 기법의 구조

### 1. 제안하는 SMS 단독운전 기법의 역률각

제안하는 SMS 단독운전 기법을 적용한 전류 제어 구조는 그림 5의 기존 전류 제어 구조와 같다. 차이점은 단독운전 검출을 위한 역률각을 생성하는 방법이며 이는 그림 6(b)과 같다. 제안한 구조는 기존 구조에서 사용한 공칭 주파수 대신 추정된 계통 주파수를 저역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF)에 통과시킨 값을 사용한다. 추정된 계통 주파수와 저

역 필터를 통과한 주파수 값의 차이를 SMS IDM의 주파수 변동 값에 사용한다. 이를 적용한 식은 아래 식과 같다. 이때,  $f_{LPF}$ 는 저역 통과 필터를 지난 계통 주파수이다.

$$\theta_{SMS} = \theta_M \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_{PLL} - f_{LPF}}{f_\Delta}\right) \quad (6)$$

### 2. 저역 통과 필터 설계

단독운전 기법들은 단독운전 조건이 발생하면 최소 0.15초 안에 단독운전을 판단할 수 있어야 한다. SMS 알고리즘은 PLL을 통하여 추정된 계통 주파수가 증가할 때, 60.5Hz가 되기까지 0.15초가 소요되지 않아야 한다. 즉, 0.15초 동안 계통 주파수가 0.5Hz 증가할 수 있도록 전류 역률각에 변화를 줄 수 있어야 하며, 이는 0.6초의 주기를 갖는 1.6Hz 성분으로 가정할 수 있다. 따라서, 1.6Hz보다 빠른 주파수를 갖는 계통 주파수 변화 성분은 역률각 생성을 위해 그대로 통과시켜야 하므로 차단 주파수는 1.6Hz보다 충분히 낮은 주파수로 설계해야 하며, 본 논문에서는 10배 낮은 주파수인 0.16Hz로 저역 통과 필터의 차단 주파수를 설계하였다.

### 3. 제안한 SMS 기법의 단독운전 검출 성능

제안하는 SMS 단독운전 기법의 단독운전 검출 성능을 확인하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 PLECS 프로그램을 사용하였고, 시스템의 제정수는 표 1과 같다.

Table 1. Parameters of single phase inverter system for islanding detection.

표 1. 단독운전 검출 시험을 위한 단상 인버터 시스템 제정수

Parameters	Value	Unit
Rated Power	600	W
Voltage	200	Vrms
Grid Nominal frequency	60	Hz
$Q_f$	10	-
R	80	$\Omega$
L	21.2	mH
C	331	$\mu$ F

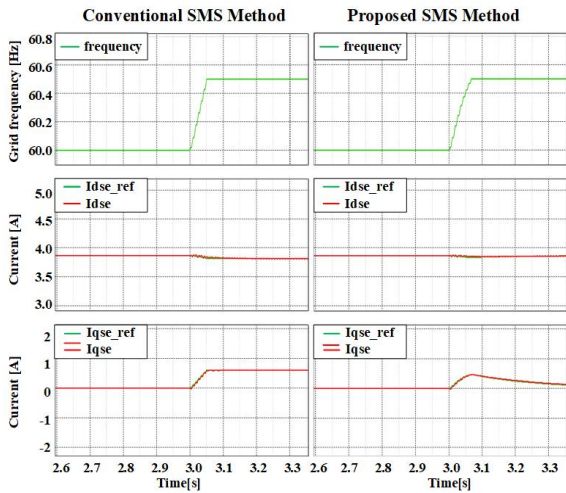


Fig. 7. Simulation results of conventional and proposed Islanding detection method.

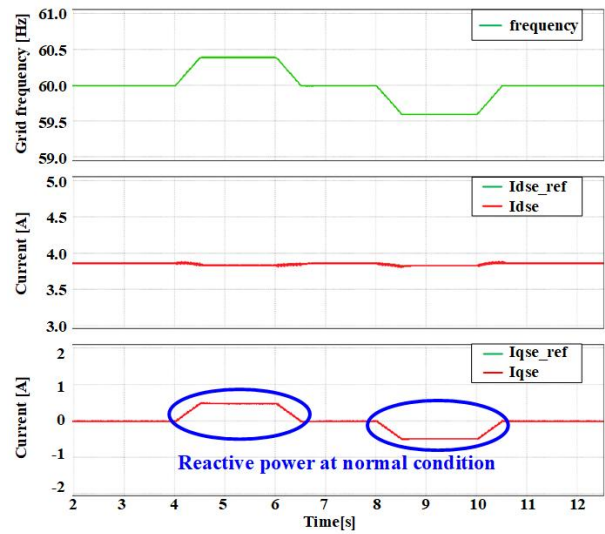
그림 7. 기존/제안하는 단독운전 검출 시뮬레이션 결과

SMS 단독운전 검출에서  $\theta_{SMS} = 35^\circ$  로 설계하였다. 그림 7은 SMS 단독운전 검출 기법을 적용하였을 때 계통 주파수, d축 전류와 지령, q축 전류와 지령을 도시하고 있다. 왼쪽 그림은 기존의 SMS 기법을 적용한 결과이며 오른쪽 그림은 제안한 SMS 기법을 적용한 결과이다. 계통 차단 시간은 3s에서 발생하였다. 기존의 SMS 기법은 약 50ms 이후에 단독운전을 검출하였고, 제안된 SMS 기법은 약 65ms 이후에 검출하였다. 제안된 SMS 기법은 기존보다 약 15ms 늦게 검출하지만, 기준인 200ms 보다 훨씬 빠르게 검출할 수 있다.

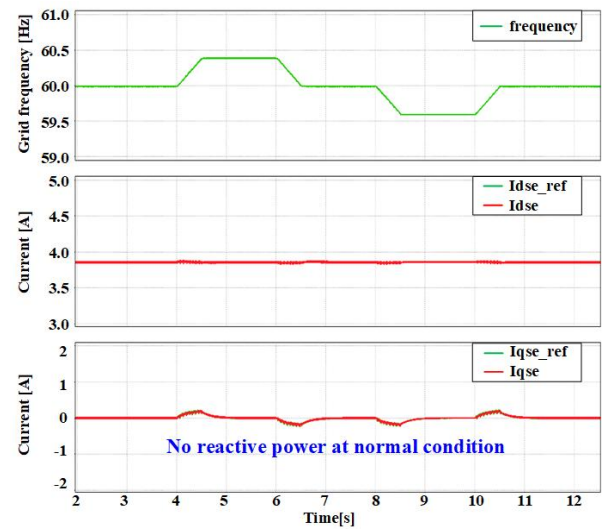
4. 제안한 SMS 기법의 정상 계통 조건 성능

기존의 SMS 단독운전 검출 기법은 계통 전원이 정상적으로 계통에 연결되어 있으면서 주파수가 허용 범위 안에 있을 때, 무효 전력을 만든다는 단점을 가지고 있다. 이러한 무효 전력은 단독운전 검출을 위한 불가피한 한계이다. 전력 품질의 저감을 개선하기 위해서 제안된 방법은 정상 계통 조건에서 무효 전력을 인가하지 않도록 저역 통과 필터를 사용하였다.

그림 8은 계통의 정상 조건에서 주파수가 허용 범위인 59.6Hz부터 60.4Hz까지 변할 때 전력 품질을 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 기존 방법은 주파수가 공칭 주파수로부터 0.4Hz 달라졌을 때, 무효 전류가 약 0.5A가 흐르고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 제안된 방법은 계통의 정상 조건에서 무효 전류가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.



(a) Power quality of conventional method  
(a) 기존 방법의 Power quality



(b) Power quality of proposed method  
(b) 제안한 방법의 power quality

Fig. 8. Power quality of conventional and proposed method in normal grid condition.

그림 8. 정상 계통 조건에서 기존 및 제안한 단독운전 검출 방법의 시뮬레이션 결과

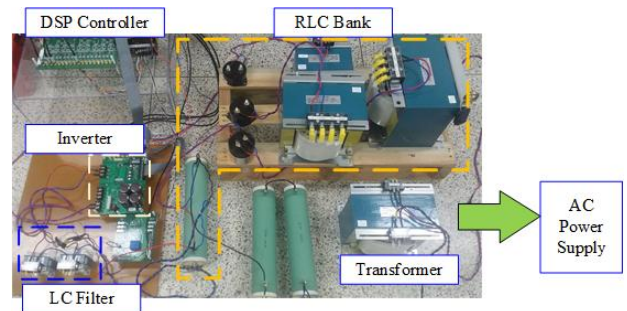


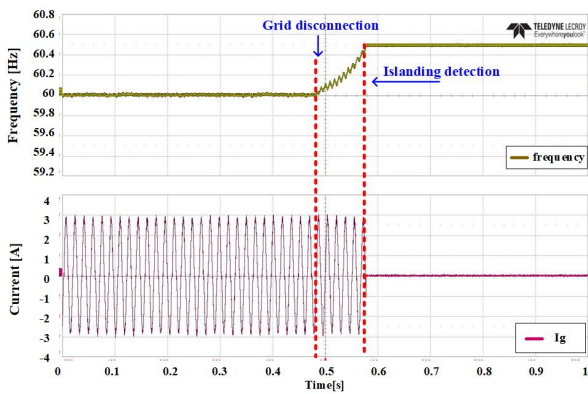
Fig. 9. Islanding detection experimental setup.

그림 9. 제안된 단독운전 기법의 검증을 위한 실험 세트

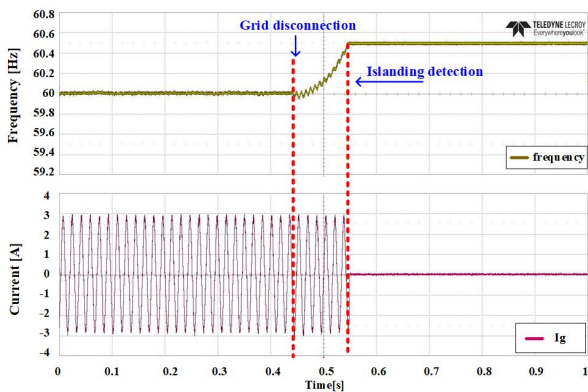
### IV. 실험 결과

그림 9는 제안된 단독운전 기법의 성능을 확인하기 위해 구현한 단독운전 검출 실험 세트이다. 인버터의 용량은 600W의 전력을 전달하도록 설계되었다. 단독운전 검출을 위한 RLC 부하의 저항은 정격 입력 전압인 단상 220Vrms 기준 600W 부하가 되도록 80 옴으로 사용하였다. RLC 부하의  $Q_f$ 는 10으로 시험하였다.

그림 10(a)와 10(b)는 기존의 SMS 단독운전 검출 기법을 적용하였을 때 실험 결과와 제안한 방법의 실험 결과를 각각 나타내고 있다. 인버터에서 추정된 계통 주파수, 유효 전류, 무효 전류를 도시하고 있으며, 계통 전원은 약 0.48초에 차단되어 단독운전 조건을 발생시켰다.



(a) Islanding detection of conventional method  
(a) 기존 방법의 단독운전 검출 성능

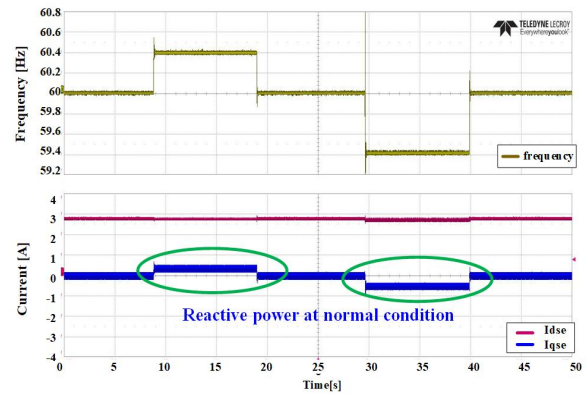


(b) Islanding detection of proposed method  
(b) 제안한 방법의 단독운전 검출 성능

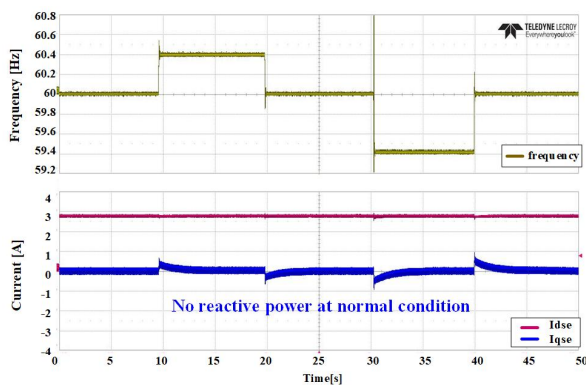
Fig. 10. Islanding detection performance.  
그림 10. 단독운전 검출 성능 비교

SMS 단독운전 검출 기법은 주파수에 따라 무효 전류를 인가하기 때문에 그림 10(a)에서 계통 차단

즉시 무효 전류가 증가되고 주파수가 증가한다. 계통 차단 후 약 90ms 이후 계통 주파수는 60.5Hz를 초과하게 되고 인버터가 단독운전 상태임을 판단하게 된다. 본 논문에서 제안한 단독운전 기법 역시 동일한 조건에서 실험되었다. 앞서 제시한 저역 필터 설계 과정을 통하여 60.5Hz가 0.15s 안에 검출되도록 차단 주파수를 0.8Hz로 설정하였기 때문에 기존의 SMS 기법과 동일하게 단독운전 검출이 가능하다. 그림 10(b)에서 계통 전원은 약 0.43초 이후 차단되었고, 90ms 이후 계통 주파수가 60.5Hz를 초과해 단독운전임을 검출한다. 기존의 SMS 기법과 동등 수준의 속도로 단독운전을 검출하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Power quality of conventional method  
(a) 기존 방법의 Power quality



(b) Power quality of proposed method  
(b) 제안한 방법의 power quality

Fig. 11. Power quality of conventional and proposed method in normal grid condition.

그림 11. 정상 계통 조건에서 기존 및 제안한 단독운전 검출 방법의 실험 결과

그림 11(a)와 (b)는 계통 전원이 연결되어 있지만, 계통 주파수가 허용 범위 안에서 흔들리는 조건에서



실험한 파형이다. 그림 11(a)에서 약 9초에 계통 주파수가 60.4로Hz 증가할 경우, 기존의 SMS 기법은 단독운전 판별을 위해 그림 11(a)과 같이 무효 전류를 인가한다. 이때 역률각은 7.3°가 발생하고 무효전류는 약 0.5A이다. 주파수가 60Hz로 돌아오는 경우, SMS 기법의 위상각은 0이 되고 그에 따라 무효 전류도 0으로 돌아온다. 약 30초에 계통 주파수가 59.4Hz로 감소하는 경우, 앞전과 같은 이유로 약 -0.6A의 무효 전류를 주입하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SMS 기법은 정상 계통 상태일 때 주파수가 허용 범위 안에서 움직이는 경우 불필요한 무효 전류를 발생시키는 단점을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 11(b)은 그림 11(a)와 동일한 조건으로 본 논문에서 제시하는 기법을 적용하였을 때 실험 파형이다. 계통 주파수가 60.4Hz 또는 59.6Hz로 움직이는 경우, 기존의 SMS 기법과 달리 무효 전류를 주입하지 않는 것을 확인할 수 있다. 계통 주파수의 변화가 단독운전임을 야기할 만큼 크지 않기 때문에 설계한 저역 통과 필터를 통해 감쇠되지 않는다. 따라서 PLL을 통하여 추정된 주파수와 저역 필터를 통과한 주파수가 거의 같기 때문에 역률각이 만들어지지 않는다. 즉 무효 전류를 발생시키지 않게 된다. 실험 결과 논문에서 제시하는 저역 통과 필터를 이용한 역률각 결정 방법을 통하여 기존의 SMS 기법의 계통 정상 상태 전력 품질을 향상시킬 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 SMS 단독운전 검출 기법이 계통 정상 상태에서 역률이 나빠지는 단점을 설명하고 이를 개선하기 위해 저역 통과 필터를 통한 역률각 결정 방법을 제시하였다. 또한 저역 통과 필터의 차단 주파수 설계 방법을 설명하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제시하는 방법은 단독운전 검출 성능이 기준 시간보다 훨씬 빠를 뿐만 아니라 계통의 정상 조건에서 무효 전력을 공급하지 않음을 확인하여 제시하는 기법의 타당성을 확인하였다.

## References

[1] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley, 2011.

- [2] M. E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.14, no.3, pp.810-816, 2003. DOI:10.1109/60.790956
- [3] *IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Std 1547.1-2005, 2005. DOI:10.1109/IEEESTD.2015.7100815
- [4] Luiz A. C. Lopes and Huili Sun, "Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.21, no.1, pp.171-180, 2006. DOI:10.1109/TEC.2005.859981
- [5] Z. Ye, R. Walling, L. Garces, R. Zhou and L. Li, "Study and Development of Anti-Islanding Control for Grid-Connected Inverters," *National Renewable Energy Laboratory*, 2004. DOI:10.2172/15007704
- [6] Jie Li, Jing Zhao, Jia Wu and Ping-ping Xu, "Improved Dual Second-order Generalized Integrator PLL for Grid Synchronization Under Non-ideal Grid Voltages including DC offset," *IEEE ECCE*, pp.136-141, 2014. DOI:10.1109/ECCE.2014.6953386

## BIOGRAPHY

### Dong-Uk Kim (Member)



2018 : BS degree in Electrical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus.  
2018~Present : Master Student Electrical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus.

### Sungmin Kim (Member)



2003 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2009 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2014 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2012~2013 : Visiting Scholar, FREEDM Systems Center, NCSU, USA.  
2014~2015 : Senior Engineer, Samsung Electronics Company.  
2015~Present : Assist. Professor, Hanyang University, ERICA Campus.