

# 정궤환을 이용한 무효전력 변동기반의 단독운전 방지 성능 검증

조종민, 안현성, 박지호, 차한주  
충남대학교 전기공학과

## Performance Verification of Anti-Islanding of Reactive Power Variation Method using Positive Feedback

Jongmin Jo, Hyunsung An, Jiho Park, and Hanju Cha  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터의 단독운전 방지를 위해 정궤환을 이용한 무효전력 변동기법을 제안하였으며, 구현 및 실험을 통해 단독운전 방지 성능을 검증하였다. PCC 지점에는 양호도(Q) 2.5의 특성을 갖는 3상 RLC 부하가 연결되며, 부하 공진주파수는 60Hz로 설정하였다. 무효전력 변동기법은 일정 크기로 주입되는 무효분과 주파수 편차를 이용한 정궤환으로부터 공급되는 무효분으로 구성된다. 계통연계 운전 시에는 일정한 무효전력 성분만이 공급되며 역률은 0.9975이다. 단독운전 발생 시, 일정 무효전력 때문에 변화된 PCC 주파수와 계통 정격주파수 간의 편차는 정궤환 성분을 활성화하고, 증가된 무효전력에 의한 PCC 주파수 변화를 검출하여 단독운전을 판단한다. 1.7kW 3레벨 T 타입 인버터를 통해 단독운전 방지 성능을 실험하였으며, 검출시간은 각각 53ms, 150ms로써 우수한 성능을 검증하였다.

### 1. 서론

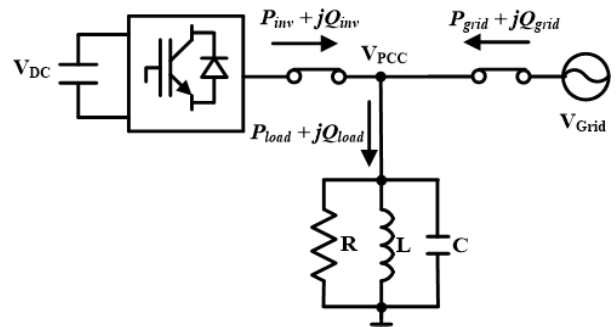
수십 년간 전 세계적으로 지구 온난화의 가속화에 따른 기후이상 현상이나 극지방 빙하의 유실에 따른 해수면 상승문제 등 환경오염의 심각성이 지속적으로 보고됨에 따라 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 지구보존을 위한 다양한 방안 및 정책들이 논의되고 있다. 가장 대표적인 부분은 신재생에너지의 보급 확대정책이며, 우리나라 또한 '신재생에너지 3020' 정책을 통해 친환경에너지원의 활용을 장려함으로써 세계적 트렌드에 발맞추어 가고 있다. 이에 따라 수 kW 소용량 가정용 태양광발전부터 대용량 풍력단지 건설과 같은 신재생에너지원을 이용한 분산전원 시스템이 크게 급증하고 있으며, 향후에는 분산전원이 보편화 될 전망이다. 그러나 무분별한 분산전원의 유입은 계통전압 및 주파수에 악영향을 미치는 등 다양한 문제들을 야기할 수 있으므로 분산전원이 계통에 접속되기 위해서는 일정 규제들을 충족해야한다. 다양한 기능들 중 본 논문에서 서술하는 단독운전은 분산전원 시스템이 갖춰야할 중요한 기능 중 하나이다. 단독운전이란 분산전원이 계통과 분리된 상태에서 지속적으로 부하에서 요구되는 전력을 단독으로 공급하는 상태를 말한다. 단독운전의 발생은 부하에 공급되는 역률을 저하시키고 작업자의 감전과 같은 인체 위협의 문제를 수반한다. 따라서 계통에 접속된 분산전원은 단독운전이 발생한 경우 이를 즉각 인지하고 분산전원의 발전을 중지해야할 필요성이 요구된다.

다. IEEE 1547.1<sup>[1]</sup>은 2초 이내에 단독운전을 방지하도록 규정하고 있으며, 국내 태양광발전 설비심사세부기준<sup>[2]</sup>에서는 0.5초 이내에 단독운전을 방지하도록 규정하고 있다. 단독운전 검출 방식은 수동기법과 능동기법으로 분류할 수 있다. 수동기법<sup>[3]</sup>은 분산전원이 인입한 PCC (point of common coupling) 지점의 주파수와 전압을 감지하여 변동이 발생한 경우 단독운전을 판단하는 기법으로 가장 간단한 방법이나 계통연계형 인버터에서 공급하는 전력과 부하의 전력이 일치하는 경우에는 전압 및 주파수 변동이 발생하지 않기 때문에 불검출 영역이 발생하는 단점을 갖는다. 단독운전 검출을 위해 많은 연구가 진행되는 방식은 능동기법<sup>[4]</sup>으로 인위적으로 외란요소를 주입함으로써 단독운전 발생 시 PCC 전압이나 주파수를 강제로 변동시켜 단독운전을 검출하는 방식이다. 능동기법 중 일정 무효전력을 지속적으로 주입하여 단독운전 발생 시 PCC 주파수의 상승 및 저하상태를 야기하는 무효전력변동을 이용한 방식이 많은 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 기존에 연구된 무효전력변동 기법에서 단독운전 검출시간을 향상시키기 위한 정궤환 방식을 적용한 방식을 제안하였으며, 실험을 통해 성능을 검증하였다.

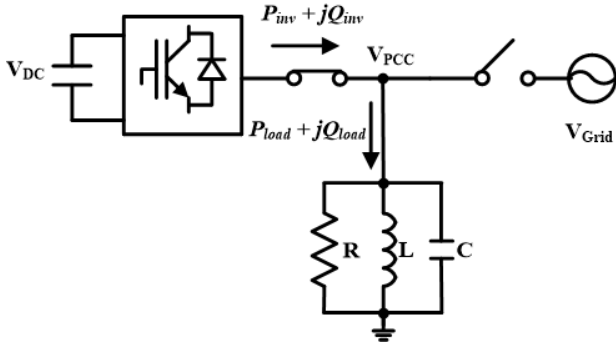
### 2. 단독운전 및 시스템 구성

#### 2.1 단독운전 구성 및 특성

그림 1은 IEEE 1547.1에서 제시하는 단독운전 검출시험 회로를 보여주는 것으로 계통연계형 인버터, 3상 RLC 부하 및 계통으로 구성된다. 그림 1(a)는 분산전원을 구성하는 인버터가 계통의 PCC 지점에서 병렬로 인입되어 부하에서 요구되는 전력을 계통과 동시에 공급하는 계통연계 동작으로 부하의 유효 및 무효전력은 식 (1)과 같다.



(a) 계통연계 운전



(b) 단독운전

그림 1 단독운전 검출시험 회로

Fig. 1 Test circuits of islanding detection

$$\begin{aligned} P_{load} &= P_{\in v} + P_{grid} \\ Q_{load} &= Q_{\in v} + Q_{grid} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 1(b)는 계통이 분리된 상태로 계통에서 공급되는 전력은 0이며, 인버터가 단독으로 공급하는 단독운전 회로 조건으로 부하의 유효 및 무효전력은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{load} &= P_{\in v} \quad \because P_{grid} = 0 \\ Q_{load} &= Q_{\in v} \quad \because Q_{grid} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1(b)와 같은 단독운전이 발생한 경우 PCC 주파수  $f$ 와 인버터에서 공급하는 무효전력  $Q_{inv}$ 의 관계는 식 (3)과 같은 특성을 갖는다.  $f_r$ 는 부하 공진주파수,  $Q_r$ 는 부하 양도도이며  $f$ 는 측정된 PCC 주파수를 나타낸다. 식 (3)으로부터 단독운전 조건에서 인버터로부터 양의 무효전력이 부하에 공급되는 경우 PCC 주파수는 정격 주파수로부터 감소하는 반면, 음의 무효전력이 공급되는 경우에는 정격 주파수보다 상승하는 특성을 보임을 알 수 있다.

$$Q_{\in v} = P_{\in v} \cdot Q_r \left( \frac{f_r}{f} - \frac{f}{f_r} \right) \quad (3)$$

## 2.2 시스템 구성

그림 3은 단독운전 검출시험을 위한 시스템 구성도를 보여주는 것으로 3상 3레벨 T 타입 인버터가 PCC 지점에서 3상 부하와 접속된 구조이며 시스템 파라미터는 표 1과 같다. RLC 수동부하는 병렬구조로써 부하 공진주파수는 60Hz 정격주파수와 동일하다. 부하가 접속된 PCC 지점과 계통 사이에 차단기를 구성함으로써 차단기 on/off 상태에 따라 계통연계 및 단독운전 상황을 구현하였다.

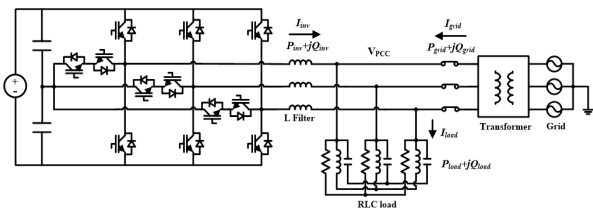


그림 3 단독운전 검출시험을 위한 시스템 구성도

Fig. 3 Configuration of systems for islanding detection

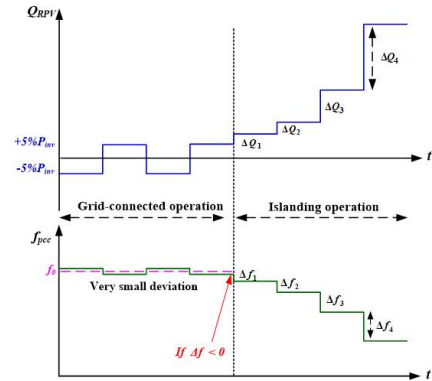
표 1 시스템 파라미터

Table 1 The system parameters

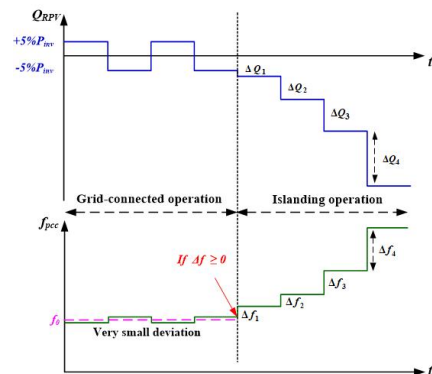
파라미터	기호	값
계통 전압	V	220V <sub>rms</sub>
계통 주파수	f	60Hz
저항 부하	R	9.1Ω
인덕터 부하	L	9.67mH
커패시터 부하	C	725uF

## 3. 정제환을 이용한 무효전력 변동기법

그림 4는 본 논문에서 제안하는 정제환을 이용한 무효전력 변동 기법의 개념을 보여주는 것으로 계통연계 및 단독운전 조건에 관계없이 2가지 성분으로 구성된다. 첫 번째 성분은 인버터가 공급하는 유효전력의  $\pm 5\%$  크기에 해당하는 무효전력을 일정하게 공급하는 요소로써 PCC에서 측정하는 계통 주파수의 한 주기마다 공급된다. 일정 크기의 무효전력 성분은 단독운전 발생 시, 부하에서 요구되는 무효전력과 불일치 상태를 발생시켜 PCC 주파수를 특정 크기만큼 변화시킴에 따라 정제환 성분을 활성화 하는 역할을 수행한다. 주입되는 무효분 극성은 측정된 PCC 주파수가 정격 주파수보다 작을 때  $+5\% \cdot P_{inv}$  무효분을, 크거나 같은 경우에는  $-5\% \cdot P_{inv}$  무효분을 공급한다.



(a)  $f < f_0$  조건



(b)  $f \geq f_0$  조건

그림 4 제안된 정제환 기반의 무효전력변동 기법

Fig. 4 The proposed reactive power variation method based on positive feedback

계통연계 운전 시 역률은 THD 5%를 가정할 때, 식 (4)로부터 0.9975로 계산된다. 두 번째 요소는 측정된 PCC 주파수와

정격 주파수 간의 편차에 비례하는 무효전력을 공급하는 정제환 성분이며, 계통연계에서는 주파수 편차는 매우 작으므로 정제환 영향은 없다. 단독운전이 발생한 경우, 일정크기의 무효전력으로 인해 발생한 주파수 편차로부터 정제환이 활성화됨에 따라 주입되는 무효전력의 크기는 지속적으로 증가하고 이로 인해 PCC 주파수 성분은 정격 주파수로부터 변동하는 특성을 갖는다. 그림 4(a)와 같이 측정된 PCC 주파수가 정격 주파수보다 작아  $+5\% \cdot P_{inv}$  무효분이 공급되는 시점에서 단독운전 발생한 경우, 정제환으로부터 더 큰 양의 무효전력을 공급하여 주파수를 저하시켜 저주파수 임계값을 벗어나면 단독운전으로 판단한다. 이와 반대로 그림 4(b)와 같이 PCC 주파수가 정격 주파수보다 크거나 같아서  $5\% \cdot P_{inv}$  무효분이 공급되는 시점에 단독운전 발생한 경우에는 음의 무효전력을 공급하여 주파수를 상승시키고 과주파수 임계값을 벗어나면 단독운전으로 판단하여 인버터 운전을 정지한다.

$$P.F = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{Q_{\epsilon v}}{P_{\epsilon v}} \right) \right\}$$

(4)

#### 4. 실험결과

그림 5는 단독운전 성능검증을 위한 실험 구성을 보여주는 것으로 3상 3레벨 T 타입 인버터, 3상 RLC 부하 및 계통으로 구성되며 그림 3과 동일한 구조이다.

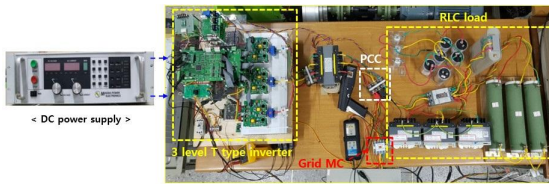


그림 5 단독운전 성능검증을 위한 실험 구성  
Fig. 5 The experimental configuration for verification of islanding detection

그림 6은 제안된 무효전력변동 기법의 단독운전 성능 실험 결과를 보여준다. 그림 6(a)는 유효전력의  $+5\%$  크기에 해당하는 일정 무효전력이 주입되고 있는 시점에서 단독운전이 발생한 조건이며, 정제환 성분의 활성화로 인해 주입되는 무효전력의 크기가 증가하고 PCC 주파수는 지속적으로 감소한다. 저주파수 임계값인 57Hz보다 작아짐에 따라 단독운전으로 판단하고 인버터는 정지하였으며, 단독운전 검출시간은 150ms이다.

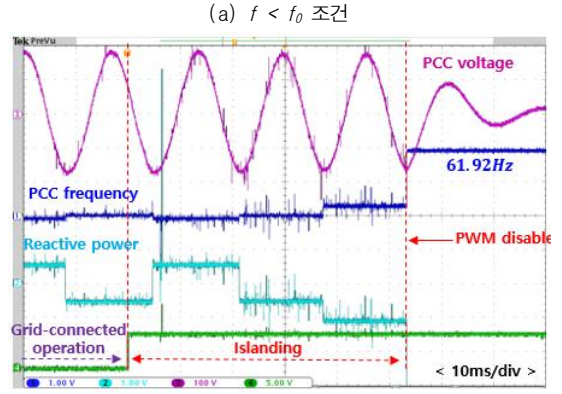
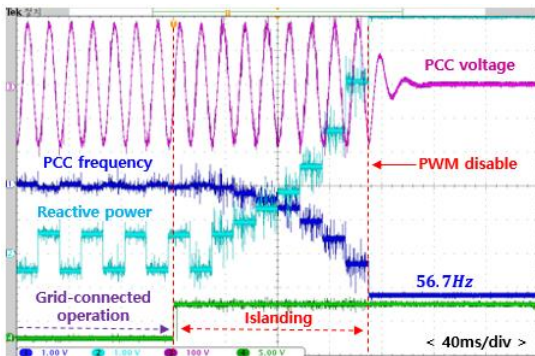


그림 6 단독운전 검출성능 실험  
Fig. 6 Experimental results of islanding performance

그림 6(b)는 유효전력의  $5\%$  크기에 해당하는 일정 무효전력이 주입되고 있는 시점에서 단독운전이 발생한 조건으로 정제환 성분이 활성화됨에 따라 주입되는 무효전력의 크기가 음의 값으로 증가하고, 이 때 PCC 주파수는 정격주파수 보다 상승한다. 과주파수 임계값인 60.5Hz를 초과함에 따라 단독운전 조건으로 판단하여 인버터는 정지하였으며, 단독운전 검출시간은 53ms이다.

#### 5. 결론

본 논문은 계통연계형 인버터의 단독운전 방지를 위해 정제환을 이용한 무효전력 변동기법을 제안하였다. PCC 지점에는 양호도( $Q_f$ ) 2.5의 3상 RLC 부하로 구성되며, 부하 공진주파수는 60Hz이다. 무효전력 변동기법은 일정 크기로 주입되는 무효분과 주파수 편차의 정제환을 이용한 무효분으로 구성된다. 단독운전 발생 시, 일정 무효전력 때문에 변화된 PCC 주파수와 계통 정격주파수 간의 편차는 정제환 성분을 활성화하고, 증가된 무효전력에 의한 PCC 주파수 변화를 검출하여 단독운전을 판단하였다. 1.7kW 3레벨 T 타입 인버터를 통해 단독운전 방지 성능을 실험하였으며, 검출시간은 각각 53ms, 150ms로써 우수한 성능을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resource with electric Power Systems, IEEE standard 1547.1 2005, July 2005.
- [2] Test Procedure of Islanding Prevention Measures for Utility Interconnected Photovoltaic Inverters, Korean Standards Association, KS C IEC 62116:2015.
- [3] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of Anti Islanding Schemes based on Nondetection Zone Concept" IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1171-1176, Sep. 2004.
- [4] J. Zhang, D. Xu, G. Shen, Y. Zhu, N. H., and J. Ma. "An Improved Islanding Detection Method for a Grid Connected Inverter with Intermittent Bilateral Reactive Power Variation" IEEE Trans. Power Electron.,