# 단상 계통연계형 PCS의 단독운전 검출기법 비교 분석

정영석*, 소정훈*, 유권종*, 강기환*, 최재호**
*한국에너지기술연구원, **충북대학교

# Analysis of Active Islanding Dectetion Methods for a Single-phase Photovoltaic Power Conditioning Systems

Jung Youngseok*, So Jeonghun*, Yu Gwonjong*, Kang Gihwan*, Choi Jaeho**
*KIER, **Chungbuk National Univ.

**Abstract** - Increasing numbers of photovoltaic arrays are being connected to the power utility through the power conditioning systems (PCS). This has raised potential problems of network protection. If, due to the action of the PCS, the local network voltage and frequency remain within regulatory limits when the utility is disconnected, then islanding is said to occur. In this paper, the representative methods to prevent the islanding are described and a PSIM-based model and analysis of the reactive power variation (RPV) method are presented. A novel phase detector using the all-pass filter and digital phase locked loop (DPLL) is proposed especially for the single-phase PCS. Finally, this paper provides the simulation and experimental results with a single-phase 3kW prototype PCS. Islanding test method of IEEE Std. 929-2000 was performed for verification.

## 1. 서 론

단독운전 현상이란 계통연계형 태양광발전시스템과 같은 분산전원이 계통전원이 정전된 후에도 발전을 지속하는 현상이다. 단독운전 현상은 계통이 복귀되는 순간에 PCS(Power Conditioning System)와 계통간의 위상차 등의 이유로 PCS 및 계통설비에 심각한 영향을 줄 가능성이 존재하므로, 계통연계형 PCS에 이러한 단독운전 현상을 검출하여 PCS 운전을 정지시키는 보호기능이 내장되어야 한다. 단독운전 검출기법은 크게 수동적 검출기법과 능동적기법으로 분류될 수 있는데, 능동적 검출기법은 주파수변동방식(Active Frequency Drift, AFD)와 무효전력변동방식(Reactive Power Variation, RPV)이 대표적이다. AFD는 PCS 출력전류의 주파수를 계통전압보다 약간 높거나 또는 낮게 제어함으로써 단독운전 발생시 전압의 주파수가 정상레벨을 벗어나도록 하여 단독운전을 검출하는 방식이다. 그러나 이 방법은 PCS의 출력전력의 품질을 저하시키는 단점이 있다[1]. RPV는 출력전력의 역률을 주기적으로 변동시켜 단독운전을 검출하는 방식이다. 이 방법은 PCS의 출력과 연계부하가 평형상태를 벗어나도록 하는데 효과적인 방법이며, 출력전력의 품질을 손상시키지 않는 장점이 있다[2]. 본 논문에서는 RPV의 원리 및 구현방법에 대하여 기술하고, 시뮬레이션 툴인 PSiM 및 단독운전 실험을 통하여 타당성을 검증한다. 또한 단상 PCS에서 전압의 위상을 효과적으로 검출할 수 있는 새로운 방법을 소개한다.

## 2. 무효전력 변동방식(RPV)

RPV는 PCS의 출력전력을 주기적으로 변동방식으로 계통과 연계시에 PCS의 출력전압의 주파수는 계통전압의 주파수와 일치하며, PCS의 무효전력에 대한 영향은 존재하지 않는다(그림 1. (a)). 그러나, 계통이 소실되었을 경우 PCS의 출력전압의 주파수는 무효전력의 변동에 따라 이동하게 된다(그림 1. (b)). 그러므로 PCS의 출력전압의 주파수를 감시함으로써 단독운전 현상을 검출할 수 있다. 그림 2에 출력전류의 제어 블록다이어그램을 보이고 있다. 그림 2에서 보이는 것처럼 무효전력의 변동주기는 500ms이며, 무효전력에 상응하는 전류의 크기(Iinv_Q_pk_ref)는 유효전력분 출력전류(Iinv_P_pk_ref)의 ±5%이다. PCS의 제어를 위한 출력전류 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Iinv_P_ref &= Iinv_P_pk_ref \cdot \sin(wt_pll) \\ Iinv_Q_ref &= Iinv_Q_pk_ref \cdot \cos(wt_pll) \\ Iinv_ref &= Iinv_P_ref + Iinv_Q_ref \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Iinv_ref는 출력전류의 레퍼런스이다.

## 3. 단상 PCS의 위상동기화(PLL) 기법

계통전압의 정확한 위상 정보는 계통연계형 PCS에서 매우 중요한 정보 중의 하나이다. 이러한 전압의 위상정보는 주파수 검출과 유무효전력 계산 등에 사용된다.

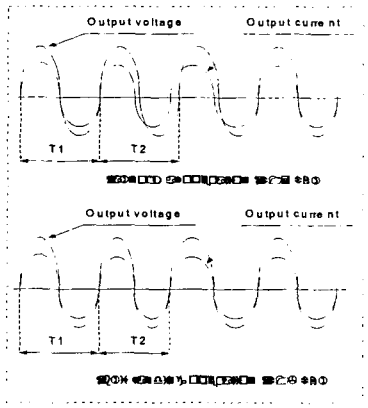


그림 1. RPV를 적용한 PCS의 출력전압, 전류의 파형

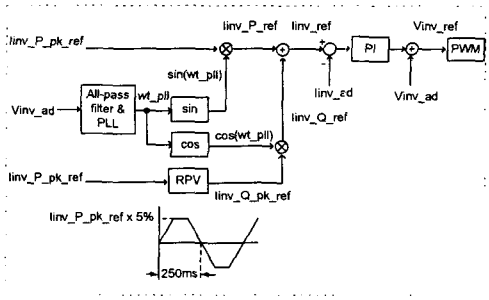


그림 2. RPV의 제어 블로도

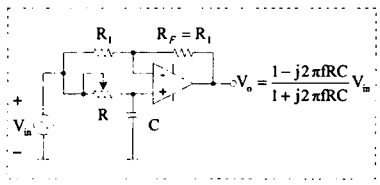


그림 3. All-pass filter 회로

위상정보의 검출 및 동기화를 위해 PLL(Phase Lock Loop)이 이용되는데, 단상 시스템의 경우 대부분 영점교차방식(Zero-crossing)을 기본으로 하고 있다. 이 방식은 전압성분의 왜곡에 대해 특히 민감하여 위상 검출이 실패할 가능성이 높다[4]. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완한 새로운 디지털 PLL기법을 제안한다.

### 3.1 All-pass filter

All-pass filter는 입력신호의 모든 주파수 및 크기는 유지하고, 위상만을 쉬프트하는 필터이다. 그림 3은 이러한 all-pass filter의 회로를 보이고 있으며, 입력전압과 출력전압의 관계는 식 (2)와 같다[3].

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{1-j2\pi fRC}{1+j2\pi fRC} \tag{2}$$

여기서, $f$는 입력신호의 주파수이다.

식 (2)를 통해 $v_o/v_{in}$의 크기는 1이며, 입력과 출력의 위상쉬프트는 주파수 $f$의 함수로 표현된다. 위상각 $\phi$는 다음 식 (3)과 같다.

$$\phi = -2\tan^{-1}(2\pi fRC) \tag{3}$$

아날로그 필터의 전달함수는 식 (4)로 정의되며, 디지털 all-pass filter의 전달함수는 다음 식(5)으로 표현된다.

$$H_i(s) = -\frac{s-a}{s+a},\quad a = \frac{1}{RC} \tag{4}$$

$$H_i(z) = \frac{Y[z]}{X[z]} = \frac{\beta+z^{-1}}{1+\beta z^{-1}},\quad \beta = \frac{-1+aT/2}{1+aT/2} \tag{5}$$

여기서 $T$는 샘플링시간이다.

따라서, 식 (3)~(5)를 이용하면 입력전압에 대하여 크기 및 주파수는 유지하면서 위상만 쉬프트된 출력전압을 얻을 수 있으며, 이를 통하여 단상 시스템에서 dq변환을 이용한 PLL기법을 적용할 수 있다.

### 3.2 단상 PLL 기법

계통전압 $U_{qs}$와 90°쉬프트 된 $U_{ds}$를 이용하여, 단상 PLL 모델을 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[3].

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U\cos(\theta) \\ U\sin(\theta) \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} U_{qe} \\ U_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta^*) & -\sin(\theta^*) \\ \sin(\theta^*) & \cos(\theta^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} \tag{7}$$

식 (7)에 (6)을 대입하여 정리하면 다음의 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} U_{qe} \\ U_{de} \end{bmatrix} = U\begin{bmatrix} \cos(\theta^*-\theta) \\ \sin(\theta^*-\theta) \end{bmatrix} = U\begin{bmatrix} \cos(\triangle\theta) \\ \sin(\triangle\theta) \end{bmatrix} \tag{8}$$

계통전압의 위상 $\theta$와 PLL의 위상 $\theta^*$의 차이인 $\triangle\theta$를 zero로 제어함으로써, 계통전압과 동일한 위상정보를 얻을 수 있다.

## 3. 단독운전 검출 시험

단독운전 검출 시험 방법은 IEEE 929-2000에 자세히 언급되어 있으며[5], 그림 4에 단독운전 검출 시험에 대한 시뮬레이션 구성도를 보이고 있다. 단독운전 시험을 위한 파라미터는 다음과 같다.

$P_{inv} = 3.09\,\text{kW},\ P_{q-inv} = 8.59\,\text{kVar}$
$P_{qL} = 7.725\,\text{kVar},\ P_{qC} = 7.699\,\text{kVar}$
$R = 15.61\Omega,\ L = 93.144\,\text{mH},\ C = 75.625\,\text{uF}$

계통전원은 700ms에서 차단하였으며, 무효전력 변동방식을 적용하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내고 있으며, 그림 6에는 무효전력 변동방식을 적용한 경우의 실험결과를 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 계통전원이 차단 된 후에도 출력전압의 주파수가 약간 변동하였을 뿐, 정상 범위 내의 주파수를 유지하므로, 단독운전 검출에 실패한 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 6에서 보이는 바와 같이 무효전력 변동방식을 적용한 경우, 계통전원이 차단 된 이후 약 200ms 이내에 주파수가 제한 레벨(±0.5Hz)까지 변동하며 이후에도 변동폭을 넓히고 있어, 단독운전 검출이 가능함을 알 수 있다.

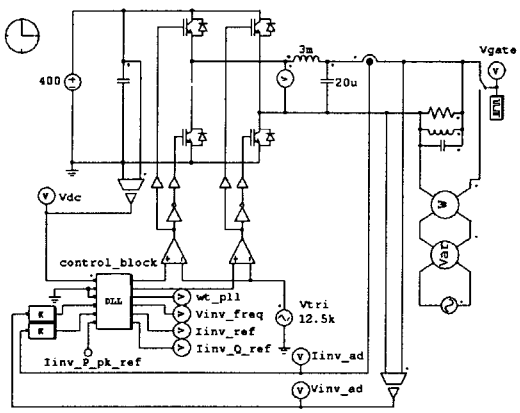


그림 4. 단독운전 시험을 위한 시뮬레이션 구성도

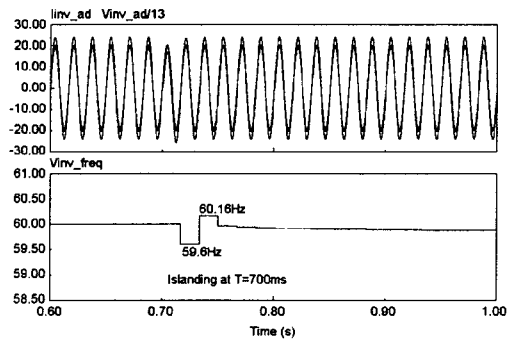


그림 5. RPV를 적용하지 않은 경우의 주파수 변동 파형

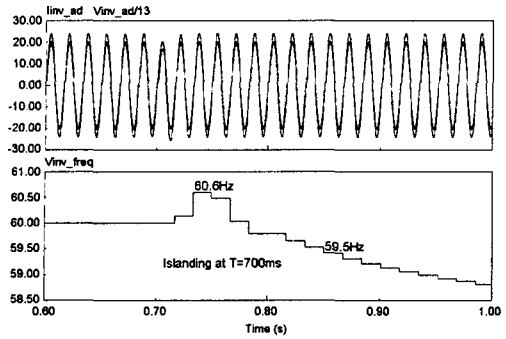


그림 6. RPV를 적용한 경우의 주파수 변동 파형

제안한 무효전력 변동방식의 타당성을 검증하기 위하여 프로토타입의 3kW PCS를 구성하였다. 표 1에 실험을 위해 사용된 파라미터를 나타내었다.

표 1. 단독운전 실험에 사용된 파라미터

| | | |
|---|---|---|
| PCS output power | $P_{inv}$ | : 3 kW |
| | $P_{q\text{-}inv}$ | : 0.285 kVar |
| Parallel RLC load | $P_R$ | : 7.33 kVar |
| | $P_{qL}$ | : 7.09 kVar |
| | $P_{qC}$ | : 2.49 kW |

그림 7에 제안한 방식의 실험 결과를 나타내고 있다. 출력전류의 THD는 2.73%이며 정격출력에서의 평균 역률은 0.995이다. 그림 8에 단독운전 검출시의 파형을 보이고 있으며, 계통전원 차단 후 약 160ms안에 검출하여 정지하고 있으며, 이는 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다.

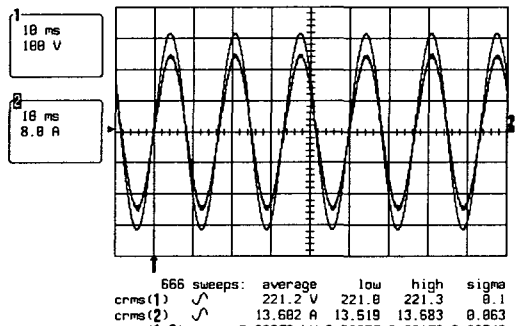


그림 7. 3kW 프로토 타입 PCS의 전압, 전류 파형

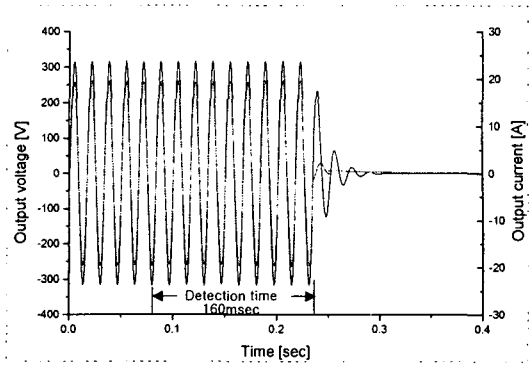


그림 8. 단독운전 검출 시험 결과 파형

## 4. 결 론

본 논문에서는, all-pass filter를 이용한 단상 PLL 기법을 통하여 정확한 위상 정보를 검출함으로써, 대표적인 단독운전 검출 기법인 무효전력 변동방식을 구현하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

무효전력 변동방식은 출력전력을 역률을 주기적으로 변동시켜 단독운전 발생 시 출력전압의 주파수가 변동되어 정상 레벨을 벗어나도록 하는 기법이며, 특히 출력전류의 THD에 영향을 주지 않는 것이 장점이다.

### [참 고 문 헌]

[1] W. Bower and M.E. Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems," IEA-PVPS Task V Report IEA-PVPS T5-09: 2002, Mar., 2002.

[2] T.J. Liang, J.F. Chen, T.C. Mi, Y.C. Kuo, and C.A. Cheng, "Study and implementation of DSP-based photovoltaic energy conversion system," Proc. of 4th IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems, vol. 2, pp. 807 - 810, Oct. 2001.

[3] R.A. Gayakwd, Op-Amps and Linear Integrated Circuits, Upper Saddle River, New Jersey 07458, Prentice-Hall, Inc., 2000.

[4] V. Kaura and V. Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 1, pp. 58-63, Jan.-Feb., 1997.

[5] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std. 929-2000, April, 2000.