

## 계통연계형 태양광발전시스템의 새로운 단독운전 검출기법

정영석, 소정훈, 유병규, 유권종, 최재호\*

한국에너지기술연구원, \*충북대학교

### Novel islanding detection method for grid connected PV system

Youngseok Jung, Junghun So, Byunggyu Yu, Gwonjong Yu, Jaeho Choi\*

Korea Institute of Energy Research, \*Chungbuk National university

**Abstract** - This paper proposes a novel active frequency drift (AFD) method for the islanding prevention of grid-connected photovoltaic inverter. To detect the islanding phenomenon of grid-connected photovoltaic (PV) inverters concerning about the safety hazards and the damage to other electric equipments, many kinds of anti-islanding methods have been presented. Among them, AFD method using chopping fraction (cf) enables the islanding detection to drift up (or down) the frequency of the voltage during the islanding situation. However, the performance of the conventional AFD methods, which have a certain value of cf only, is inefficient and difficult to design the appropriate cf value analytically to meet the limit of harmonics. In this paper, the periodic chopping fraction based on an AFD method is proposed. This proposed method shows the analytical design value of cf to meet the test procedure of IEEE Std. 929-2000 with the power quality and islanding detection time. To verify the validation of the proposed method, the islanding test results are presented. It is confirmed that the proposed method has not only less harmonic distortion but also good performance of islanding detection compare with the conventional AFD method.

### 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[1]. 단독운전 검출기법은 크게 수동적 검출기법과 능동적 기법으로 분류될 수 있는데, 수동적 기법은 단독운전 발생시 나타나는 전압의 크기, 위상 또는 주파수의 이상현상을 검출하여 단독운전을 판단하는 방법으로, PV 발전전력과 부하의 소모전력이 평형 상태에서는 상당히 넓은 NDZ(Non-Detection-Zone)이 존재한다[2]. 능동적 기법은 인버터의 출력전류에 임의의 외란성분(주파수 또는 역률의 변동)을 주입하여 이러한 부하평형 상태가 유지되지 못하게 하여 단독운전을 검출하는 방법으로 검출성능이 비교적 우수한 편이다. 그러나 이러한 외란성분은 결과적으로 발전전력의 전력품질을 해치는 원인을 제공하므로, 능동적 기법의 적용 시에 전력품질의 기준치를 만족할 수 있도록 검토되어야 한다. 다양한 능동적 기법 중에서 AFD (active frequency drift) 기법이 검출성능의 우수한 것으로 주목

받고 있다[3]. AFD 기법은 그림 1에서 보이는 바와 같이, 전압의 영교차점에서 출력전류에 영전류를 유지하는 구간을 인가하는 방법을 취하고 있다.

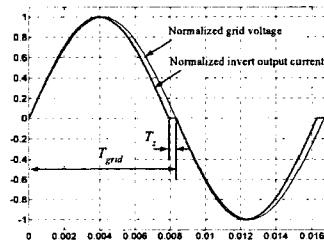


그림 1. AFD기법의 출력 전압 전류 과정

전압의 반주기동안의 영전류 인가시간의 비율은 cf(chopping fraction)으로 불리며 다음 식(1)로 정의된다.

$$cf = T_{afd} / T_{util} \quad (1)$$

단독운전 발생시 cf에 의하여 전압의 주파수가 증가 또는 감소되어 단독운전을 검출하게 된다. 그러나 cf의 값이 어떤 특정한 값으로 고정되어 있는 전형적인 AFD의 경우 넓은 영역의 NDZ가 존재하거나, 단독운전의 검출시간이 길게 된다. 이러한 단점을 보완한 기법이 AFDPF(Active Frequency Drift with Positive Feedback)이다. AFDPF는 다음 식 (2)와 같이 주파수의 변화량을 cf에 주입하여 변동시키는 방식을 취하고 있다.

$$cf_k = cf_{k-1} + F(\Delta \omega_k) \quad (2)$$

AFDPF처럼 cf의 값이 변동할 경우, 주파수의 변동이 고정되지 않고 가속되기 때문에 빠른 시간 안에 단독운전을 검출하게 된다. AFDPF의 경우 주파수 변화량을 주입하는 함수의 종류와 개인의 값이 검출 성능을 좌우하는 중요한 요소이며, 따라서 이의 시스템적인 분석이 제시되어 있으나[5] 개인과 검출성능에 대한 관계만이 언급되어 있을 뿐, 전력품질과의 관계는 언급되어 있지 않다. 본 논문에서는, IEEE Std. 929에서 규정하는 전력품질과 단독운전 검출시간을 만족하는 새로운 AFD기법을 제안하였다.

### 2. AFDPCF

AFD기법의 단점을 보완한 새로운 단독운전 검출기법을 제안하였다. 제안한 기법은 cf를 펄스의 형태로 주입하는 AFDPCF(Active frequency Drift with Pulsation of Chopping Fraction)으로 다음 식 (3)과 (4)로 정의된다.

$$cf = \begin{cases} cf_+ & \text{if } \Delta\omega \geq 0 \\ cf_- & \text{if } \Delta\omega < 0 \\ 0 & T_{cf\_off} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta\omega = \text{mean}(\omega_k) - \omega_0 \quad (4)$$

여기서,  $cf_+$ 와  $cf_-$ 는 각각  $cf$ 의 양의 최대값과 음의 최소값이며,  $T_{cf\_off}$ 는  $cf$ 가 주입되지 않는 시간,  $\omega_k$ 는  $T_{cf\_off}$ 동안의 주파수,  $\omega_0$ 는 기본주파수를 의미한다. 제안된 기법의 순서도와 동작에 대한 설명을 그림 2와 그림 3에 보인다.

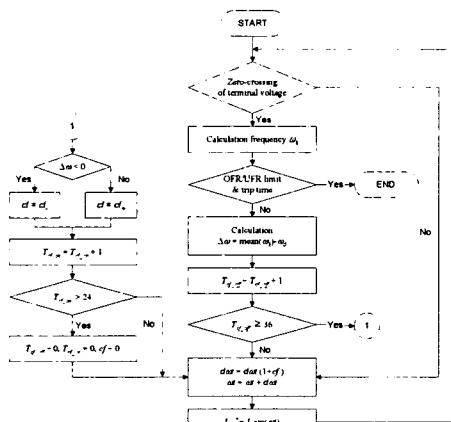


그림 2 AFDPCF의 순서도

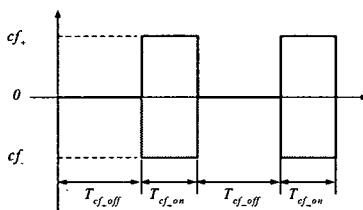


그림 3 AFDPCF의 cf 투입방법

제안된 기법인 AFDPCF에서 중요한 것은  $cf$ 의 값과 투입된 후 유지되는 시간이다. 이것은 단독운전 검출 성능과 전력품질 특히 출력전류의 고조파성분 THDi와 관계가 있기 때문이다.  $cf$ 의 크기와 THDi의 관계를 그림 4에서 보이고 있다. 그림 4에 의하여 THDi가 5%이내를 만족하기 위한  $cf$ 의 값을 선정할 수 있다. 즉  $cf_+$ 는 0.046,  $cf_-$ 는 -0.045를 선정할 경우 제안된 기법의 THDi는 항상 4.92% 이내를 유지하게 된다.

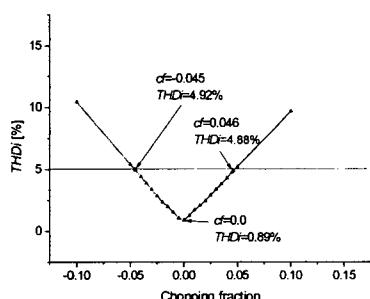


그림 4 cf의 값의 변동에 따른 전류 THDI

제안된 기법의 단독운전 검출성능에 대하여 NDZ에 대한 시스템적 분석을 이용하였다. 참고문헌 [6]에 의하면 NDZ는 그림 5에서 보이는 바와같이 단독운전 발생

전후의 유무효전력의 차에 의한 관계식 (5)와 (6)으로 표현될 수 있다.

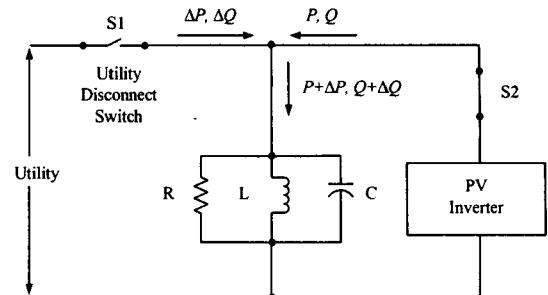


그림 5 단독운전 검출시험 구성도

$$\left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left(\frac{V}{V_{\min}}\right)^2 - 1 \quad (5)$$

$$Q \left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2 \right\} \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q \left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2 \right\} \quad (6)$$

IEEE 929에 따르면,  $V_{\max}=110\%$ ,  $V_{\min}=88\%$ ,  $f_{\max}=60.5\text{Hz}$ ,  $f_{\min}=59.3\text{Hz}$ 이므로, 식 (5)와 (6)은 다음과 같다.

$$-17.36\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 29.13\% \quad (7)$$

$$-5.94\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 4.11\% \quad (8)$$

제안된 기법은  $cf$ 를 통하여 출력전류의 THDi만을 변동시키므로 DPF(Displacement Power Factor)는 거의 1이다. 따라서 pf(power factor)는 다음 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$pf = P/S = 1/\sqrt{1+THD_i^2} \quad (9)$$

따라서 유효전력분에 대한  $cf$ 에 의하여 발생되는 무효전력성분  $Q_{cf}$ 의 비율은 다음 식 (10)과 같이 정의된다.

$$Q_{cf}/P = THD_i \quad (10)$$

단독운전 발생시 무효전력의 차가 거의 zero에 가까울 경우( $\Delta Q/P \approx 0$ ), 제안된 기법의 NDZ는 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$-4.92\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 4.88\% \quad (11)$$

식 (8)과 식(11)을 비교하면  $cf_+$ 가 인가될 경우 주파수 상한치를 벗어나지만,  $cf_-$ 가 인가될 경우 주파수 하한치 안에 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나,  $cf$ 가 투입되어 유지되고 있기 때문에 주파수는 지속적으로 감소하여 결국 하한치를 벗어나게 된다. 이는 단독운전을 안정적으로 검출하기 위해서는  $cf$ 의 유지시간이 일정시간 이상 필요하다는 것을 의미한다. 실험을 통하여 관측된 결과 주파수를 벗어나는데 걸리는 시간  $T_{trans}$ 는 18주기가 필요하였다. 따라서  $cf$ 가 투입되어 유지되는 시간  $T_{cf\_on}$ 은 다음 식 (12)와 같다.

$$T_{cf\_on} = T_{trans} + T_{trip} = 18 + 6 = 24 \text{ [cycle]} \quad (12)$$

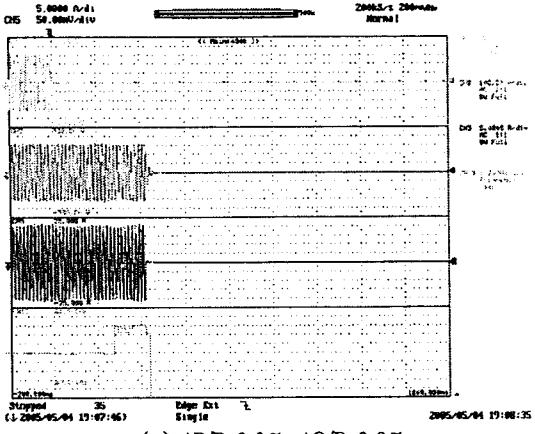
여기서,  $T_{trip}$ 는 계통의 전압이나 주파수가 짧은 시간동안 벗어나는 경우 시스템을 정지시키지 않도록 하는 최대 허용시간이다[1].  $cf$ 가 투입되지 않는 기간인  $T_{cf\_off}$ 는 규격에서 2초이내에 검출하도록 명시되어 있으므로, 검출의 안정성을 위하여 2초이내에 2번의 투입을 가정하면 다음 식 (13)으로 표현된다.

$$T_{cf\_off} = T_{cf} - T_{cf\_on} = 60 - 24 = 36 \text{ [cycle]} \quad (13)$$

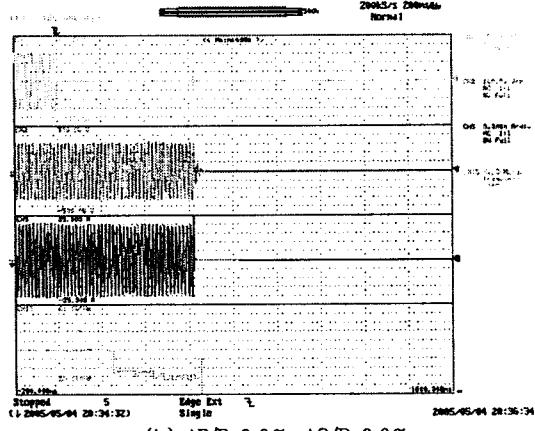
### 3. 실험결과

그림 6에 제안된 기법의 단독운전 실험결과를 보이고

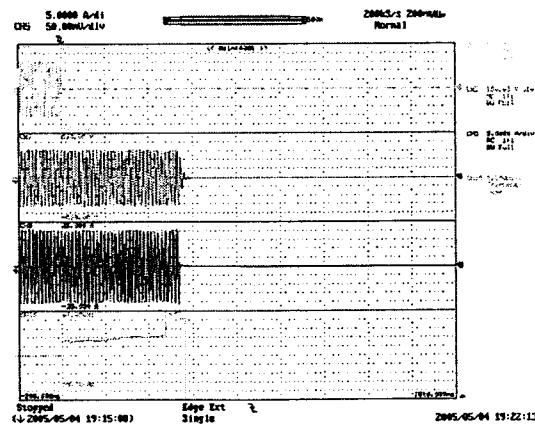
있다. (a)와 (b)는 단독운전 발생시 유무효전력의 차가 없는 경우( $\Delta P/P \approx 0$ ,  $\Delta Q/P \approx 0$ )의 결과파형이다. (a)의 경우  $cf_+$ 가 투입되어 검출된 경우이고, (b)의 경우  $cf_-$ 가 투입되어 검출된 경우이다.



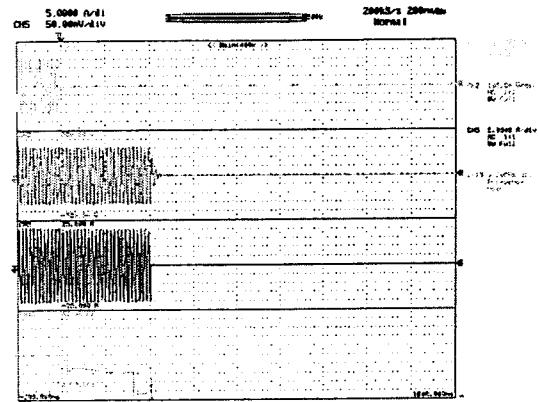
(a)  $\Delta P/P \approx 0.0\%$ ,  $\Delta Q/P \approx 0.0\%$



(b)  $\Delta P/P \approx 0.0\%$ ,  $\Delta Q/P \approx 0.0\%$



(c)  $\Delta P/P \approx 0.0\%$ ,  $\Delta Q/P \approx 5.0\%$



(d)  $\Delta P/P \approx 0.0\%$ ,  $\Delta Q/P \approx -5.0\%$

그림 6 단독운전 시험 결과파형  
(Vgrid: grid voltage, 100V/div; Vinv: inverter voltage, 100V/div; Iinv: inverter current, 5A/div; Vfreq: frequency of inverter voltage, 0.2Hz/div)

(c)는 무효전력의 차가 5%인 경우( $\Delta Q/P \approx 5\%$ )의 결과파형이며 (d)는 무효전력의 차가 -5%인 경우( $\Delta Q/P \approx -5\%$ )의 결과파형이다. 단독운전 발생 직후 무효전력의 차에 의해 주파수가 변화되었기 때문에 (c)에서처럼 주파수가 증가한 경우  $cf_+$ 가 (d)에서처럼 주파수가 감소한 경우  $cf_-$ 가 투입된 것을 확인할 수 있다. 실험결과 제안된 기법의 규격[1]에서 명시된 어떠한 부하조건에서도 2초 이내에 단독운전을 검출하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 AFD기법의 단점을 개선한 새로운 단독운전 검출기법을 제안하였다. 제안된 기법은 검출성능이 우수하며, 규격에서 제한하고 있는 전력품질을 만족하고 있다. 제안된 기법의 THD는 주기적으로 변동하고 있으므로 약 2초간의 평균값을 취할 경우 2.8%정도이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, April 2000.
- [2] Jun Yin, Liuchen Chang, and Diduch, C., "Recent developments in islanding detection for distributed power generation," 2004 Large Engineering systems Conference of Power Engineering, pp. 124-128, July 2004.
- [3] G.A. Kern, "SunSine300, utility interactive AC module anti-islanding test results," IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.1265-1268, Sept. 1997.
- [4] M.E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, Sept. 1999.
- [5] V. John, Z. Ye, and A. Kolwalkar, "Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp.1177-1183, Sept. 2004.
- [6] Z. Ye, A. Kolwalkar, Z. Yu, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," IEEE Trans. Power Electronics, vol.19, no.5, pp. 1171-1176, Sept. 2004.