

태양광발전 시스템의 단독운전법 비교

은석준, 최종우, 김흥근
경북대학교

Comparison for Islanding Method of Grid-connected PV System

Seog-Jun Eun, Jong-Woo Choi and Heung-Geun Kim
Kyung-Pook National University

ABSTRACT

Islanding of PV systems can cause a variety of problems and must be prevented. However, if the real and active powers of RLC load and PV system are closely matched, islanding detection by passive methods becomes difficult. Active methods enables islanding detection by forcing the frequency of the voltage in the island to drift up/down. This paper shows the simulation and comparison by Matlab for the active methods.

1. 서 론

태양광발전 시스템의 단독운전 현상을 확실하게 검출하고 자율적으로 정지시키는 능력을 갖도록 하는 노력이 지속적으로 연구되어 왔다.

다수의 태양광발전 시스템을 포함한 배전선이 작업으로 인한 정전 혹은 사고, 기타 등의 원인으로 계통에서 분리되었다고 태양광발전 시스템의 출력과 배전선 부하의 소비전력이 균형을 이루면 태양광발전 시스템이 배전선 부하를 떠맡아 운전을 계속한다. 이 현상을 단독운전이라고 한다. 이런 상태가 지속되어진다면 선로 유지·보수자의 감전사고가 발생할 우려가 있고 전기설비에 나쁜 영향을 줄 수 있다^[1]. 태양광발전 시스템의 단독운전시 위상의 오차로 인한 태양광발전 시스템이나 계통 시스템에 손상을 일으킬 수 있다. 이러한 이유로 계통에서의 전원 공급이 끊겼을 경우에는 시스템의 동작도 멈추도록 해야 한다.

단독운전 검출기법으로는 라인에 변화가 있을때만 검출하는 수동검출법과 인버터 출력전류에 변동을 주어 이를 이용하여 단독운전을 검출하는 능동검출법이 있다. 본 논문에서는 단독운전이 발생하는 상황과 능동검출법에 방법을 시뮬레이션을 통하여 비교, 분석하였다.

2. 본 론

1.1 단독운전 현상 고찰

계통연계형 태양광발전 시스템은 태양광발전 전력을 부하에 공급할 때, 부족전력은 상용 전력계통에서 공급하고, 잉여전력은 상용전력 계통에 공급하는 시스템이다. 그림 1은 PV(Photovoltaic)시스템과 계통간의 전력의 흐름을 나타내고 있는데, 전체 시스템은 PV시스템, 수용가 그리고 스위치(퓨즈, 재폐로 차단기 등)로 구성되어 있다. 그리고 식(1)과 식(2)는 계통 전압원을 가진 시스템에서 RLC부하에 의해 소비되어질 유효전력과 무효전력을, 노드(node) a는 계통과 PV인버터사이의 공통점(point of common coupling, PCC)을 나타낸다.

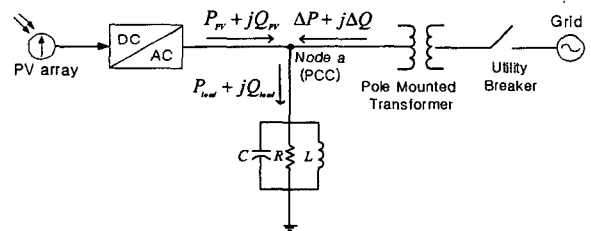


그림 1. PV 시스템과 계통의 전력흐름

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R} \quad (1)$$

$$Q_{load} = V_a^2 \left[\frac{1}{\omega L} - \omega C \right] \quad (2)$$

단독운전 검출은 PCC에서의 이상전압과 주파수의 변화를 측정하고 유효전력과 무효전력에 대한 흐름은 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{load} - P_{PV} \\ \Delta Q &= Q_{load} - Q_{PV} \end{aligned} \quad (3)$$

PV인버터 출력전류가 PCC의 전압과 같은 위상을

가질 때 무효전력 Q_{PV} 는 영이므로 $\Delta Q = Q_{load}$ 가 되고, $\Delta P = 0$ 은 계통이 끊어졌을 때 PV인버터에서 공급하는 유효전력이 부하가 필요로 하는 유효전력과 일치함을 나타낸다. 또, $\Delta Q = \Delta P = 0$ 은 계통이 끊겼을 때 부하가 요구하는 전체전력과 PV에서 공급하는 전체전력이 같음을 나타낸다.

또, $\Delta P \neq 0$ 은 PCC의 크기가 변하였음을 의미하고, $\Delta Q \neq 0$ 은 PCC의 위상변화에 따른 주파수변화를 나타낸다. $\Delta Q \neq 0, \Delta P \neq 0$ 은 계통이 끊겼을 때 부하가 요구하는 전체전력과 PV에서 공급하는 전체전력이 다름을 나타낸다.

따라서, 인버터에서는 ΔP , ΔQ 변화를 측정하여 단독운전시 전압이나 주파수의 변화를 측정한다.

전압과 주파수는 인버터의 규격 혹은 특정 범위를 벗어나면 인버터의 보호기능에 의해 차단하게 되는데, 계통전압의 전압허용범위는 정격실효치의 88% ~ 110%, 계통주파수의 오차범위는 59.3~60.5[Hz]로 IEEE Std. 929-2000에서 규정하고 있다. 하지만 단독운전 상황인 경우 검출할 수 없는 범위 즉, NDZ(Non Detection Zone)가 존재하게 되는데, 이 영역에서도 단독운전 상황을 검출하는 방법들이 연구되고 있다.

2.1. 수동적인 방법

수동적인 방식은 단독운전 상태에서의 발전량과 부하량, 선로전압, 주파수, 위상 또는 전압에 고조파 성분의 변화를 검출하는 방식이다.

수동적인 방식에서는 인버터의 과전압/저전압, 과주파/저주파를 이용하는 방식, PCC전압과 인버터 출력전류의 위상차와 THD를 모니터링하여 검출하는 방식 등이 있다.

본 논문에서의 시뮬레이션은 가상 2상 위상 검출기의 필터를 이용한 방법을 사용한 PLL 제어방식의 주파수 및 위상 검출방법^[6]을 선택하였고, RLC부하의 조건은 단독운전시 검출하기 어려운 범위를 선정하기 위하여 저항 부하는 200[V]와 230[V], 부하의 공진주파수는 59.7[Hz]와 60.3[Hz]가 되도록 하였고 0.5초에서 단독운전이 발생되었다는 가정 하에 표 1의 조건으로 시뮬레이션을 하였다.

표 1. 각 현상들에 대한 시뮬레이션 조건

(a) $\Delta P = 0, \Delta Q = 0$	$\Delta P = 0[W], \Delta Q = 0[Var]$ 인 경우
(b) $\Delta P = 0, \Delta Q \neq 0$	$\Delta P = 0[W], \Delta Q = 402.42[Var]$ 인 경우
(c) $\Delta P \neq 0, \Delta Q = 0$	$\Delta P = 7.918[W], \Delta Q = 0[Var]$ 인 경우
(d) $\Delta P \neq 0, \Delta Q \neq 0$	$\Delta P = -7.920[W], \Delta Q = -400.42[Var]$ 인 경우

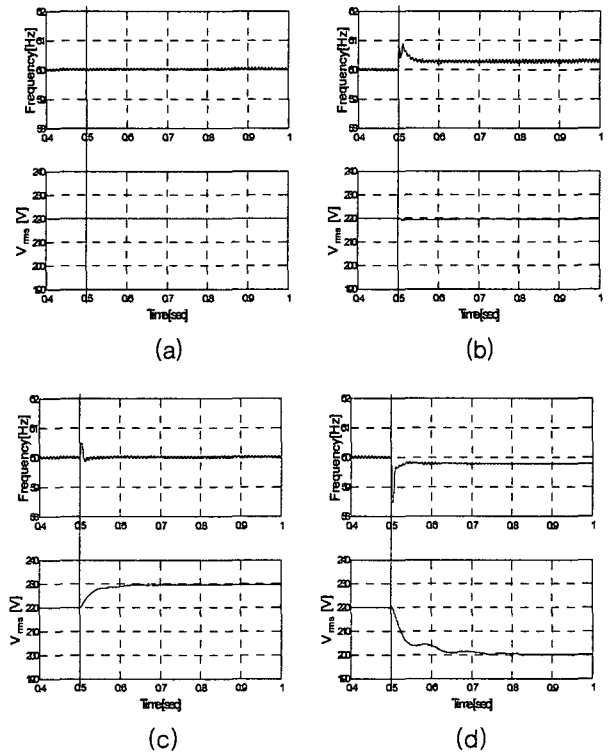


그림 2. 단독운전 현상 시뮬레이션

그림 2의 시뮬레이션결과에서 표 1의 조건을 가진 부하인 경우는 단독운전이 일어났을 때 모든 경우에 대하여 주파수나 전압을 검출하기 어렵다는 것을 볼 수 있다.

2.2 능동적인 방법

2.2.1 양계환 파라미터(positive feedback parameter)

그림 1에서 계통측에서 PV시스템을 봤을때 식(4)로 표현되는 전류원으로 볼 수 있다.

$$i_{PV} = I_{PV} \sin(\omega_{PV}t + \phi_{PV}) \quad (4)$$

식(4)에서 세가지 파라미터 $I_{PV}, \omega_{PV}, \phi_{PV}$ 는 PV인버터에서 능동적인 방식에 사용되는 파라미터로서 양계환 파라미터라고 하며, 이 파라미터를 사용하여 PV인버터의 출력전류에 변화를 주어 단독운전이 일어났을때 PCC의 전압과 주파수가 강제적으로 변하도록 만들어준다.

2.2.2 능동검출법

그림 2의 시뮬레이션과 비슷한 조건에서는 단독운전이 발생하는 경우에는 수동적인 방법으로는 검출의 어려움이 있다.

따라서, 능동적인 방식은 태양광발전 시스템의 출력전압, 주파수 또는 위상에 변동을 주어 단독운전 상태에서의 발전량과 부하량의 평형상태를 깨뜨려 적극적으로 대응하도록 동작시키는 방법이다. 이 방

법은 계통에 크게 영향을 주지 않는 범위에서 PV 인버터 전류에 변화를 주어 PCC에서의 전압이나 주파수에 이상이 있으면 PV인버터를 정지시키는 방법이다.

능동적인 방식에는 주파수 바이어스 방식, 샌디아 주파수 변동 방식, 주파수 점프 방식이 있다.

(1) 주파수 바이어스 방식(Frequency Bias)

이 방식은 그림 3과 같이 PV인버터의 출력전류에 약간의 데드타임(dead time)을 주어 부하에 공급하는 방식으로 단독운전이 일어나게 되면 그림 5와 같은 현상이 PCC에 일어나게 된다.

여기서 데드타임구간은 cf (chopping fraction)로 정의되어지는데, 계통전압의 반주기동안에 제로타임(zero time) t_z 가 어느정도 되는지를 나타내는 비율로서 식(5)로 표현된다.

$$cf = \frac{2t_z}{T_{Utility}} \quad (5)$$

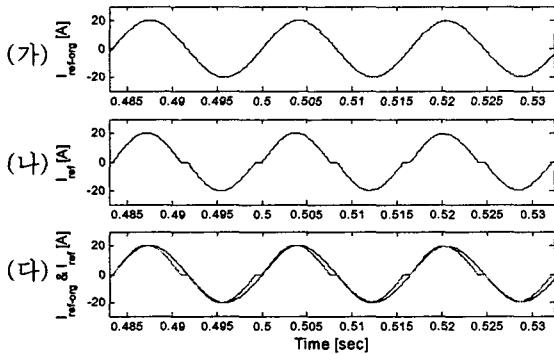


그림 3. Frequency Bias 방식을 이용한 전류지령

- (가)원래의 전류지령 (i_{ref_org})
- (나)데드타임이 추가된 전류지령 (i_{ref})
- (다) (a)와 (b)의 전류지령 비교

그림 3은 원래의 전류지령에 데드타임을 10%로 첨가한 인버터 전류지령이고, 그림 4는 그림 3(나)의 전류지령으로 하여 시뮬레이션 한 결과이다.

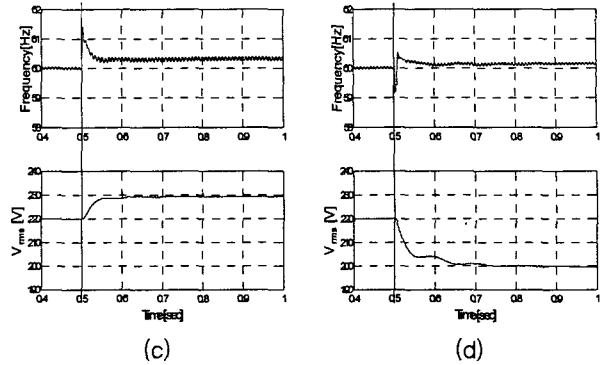
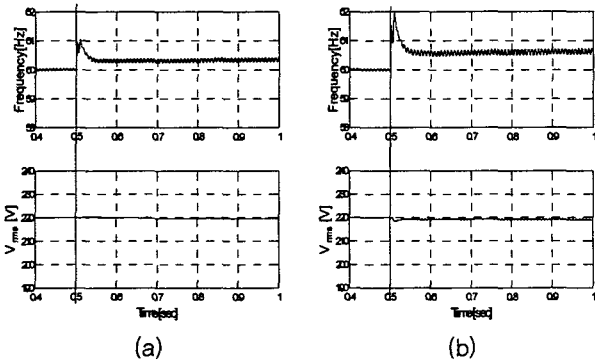


그림 4. Frequency Bias 방식을 이용한 단독운전 시뮬레이션

표 2. Frequency Bias 방식 사용시 주파수 변화

cf	공진주파수[Hz]	측정주파수[Hz]	
		수동검출법 시	Frequency Bias
10%	59.7	59.7	60.0
	60.0	60.0	60.3
	60.3	60.3	60.6

표 2에서 단독운전시 PCC에서의 주파수를 상승시켜 검출이 가능하도록 만들어 주지만, 그림 4(b)에서 보듯이 $\Delta Q \neq 0$ 이면서 높은 공진주파수를 갖고 있는 부하일 경우에만 검출이 가능하고 나머지 경우는 여전히 검출이 어려운 NDZ에 존재하게 됨을 알 수 있다.

(2) 샌디아 주파수 변동(Sandia Frequency Shift, SFS) 방식

주파수 바이어스 방식은 데드타임을 고정시키지만 이 방법은 식(6)에 의해 데드타임을 변동시켜주는 방법이다.

$$cf = cf_0 + K(f_a - f_{line}) \quad (6)$$

여기서 cf_0 는 주파수의 오차가 없을 때의 cf , f_a 는 PCC에서 검출되어진 주파수, f_{line} 은 계통의 주파수를 나타낸다. 그리고 K 는 가속계인이라고 한다.

따라서, 단독운전이 일어나게 되면 PV인버터에서는 데드타임이 변하고 있는 전류를 부하로 공급하게 된다. 따라서, 단독운전시 PCC에서의 주파수는 상승하거나 내려가고, PV인버터에서는 이 때의 주파수를 검출하는 방법이다.

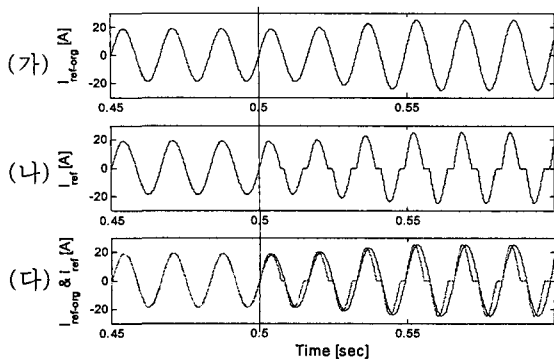


그림 5. SFS방식을 이용한 단독운전시 PV인버터 출력전류

(가) 원래의 전류지령(i_{ref_org})

(나) 단독운전시 데드타임에 의한 전류지령(i_{ref})의 변화

(다) (가)와 (나)의 전류지령 비교

그림 5는 0.5초에서 단독운전이 일어나고, 데드타임이 10%가 되도록 K 값을 선정하였고, $\Delta Q \neq 0$ 이면서 높은 공진주파수를 갖고 있는 부하인 경우의 PV인버터 전류지령을 나타낸다.

다음은 SFS방식을 이용한 단독운전 시뮬레이션이다.

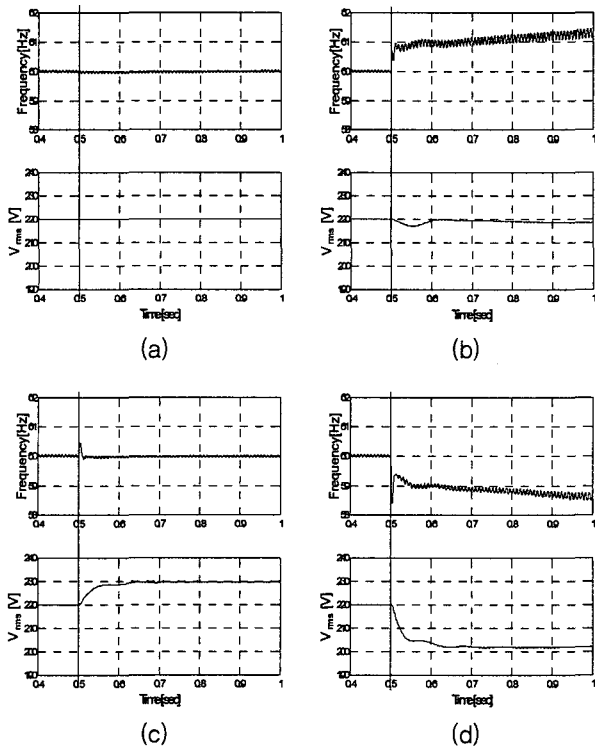


그림 6. SFS방식을 이용한 단독운전 시뮬레이션

이 방식의 경우 단독운전시 표 3에서의 주파수가 검출되어야 한다. 그러나, 그림 6의 (b)와(d)에서의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 $\Delta Q \neq 0$ 인 부하조건일

경우엔 주파수를 발산시켜 표 3에서의 결과보다 주파수 변동폭이 커짐을 확인 할 수 있다.

표 3. SFS 방식 사용시 주파수 변화

cf	공진주파수[Hz]	측정주파수[Hz]	
		Frequency Bias	SFS
10%	59.7	60.0	58.9
	60.0	60.3	60.0
	60.3	60.6	61.4

(3) 주파수 점프(Frequency Jump) 방식

이 방법은 주파수 바이어스 방식을 적용하지만 PV인버터 출력전류에 매주기마다 데드타임을 주는 것이 아니라 일정주기 동안에 주파수 바이어스 방식을 이용하여 데드타임을 주는 방식이다.

그림 7(b)는 PV인버터 전류지령을 나타낸다.

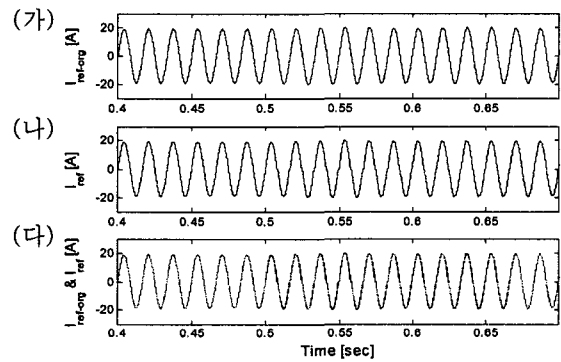


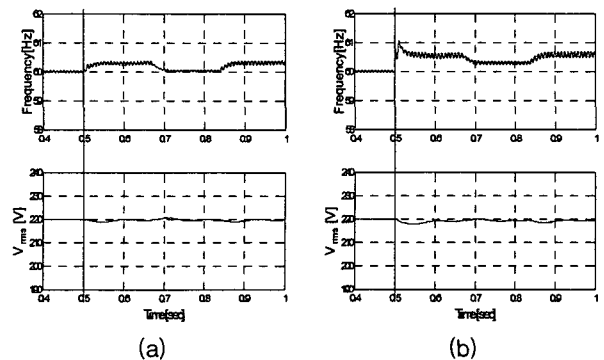
그림 7. Frequency Jump 방식을 이용한 전류지령

(가) 원래의 전류지령(i_{ref_org})

(나) 데드타임이 첨가되고 10주기마다 출력되는 전류지령(i_{ref})

(다) (가)와 (나)의 전류지령 비교

그림 8은 그림 7(나)의 전류지령으로 시뮬레이션하였고, 주파수 바이어스 방식과 비교하기 위하여 데드타임은 같은 조건인 10%를 주었다.



(a)

(b)

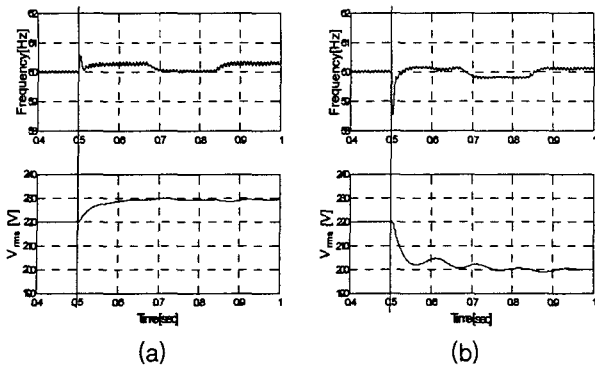


그림 8. 주파수 점프방식을 이용한
단독운전 시뮬레이션

이 방식을 사용하였을 때는 주파수 바이어스 방식과 거의 같은 NDZ를 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

계통연계형 태양광발전 시스템에서의 단독운전 검출 방법들을 각각의 부하 조건에 따라 시뮬레이션하여 비교하였다. 주파수 바이어스 방식과 주파수 점프 방식은 부하의 공진주파수가 계통의 주파수인 60[Hz]보다 높은 경우에는 검출이 가능하지만 낮은 주파수를 갖는 부하인 경우에는 검출이 어려움을 확인할 수 있었다. SFS방식은 부하의 공진주파수가 높거나 낮은 경우 즉, $\Delta Q \neq 0$ 인 경우에만 검출이 가능함을 확인할 수 있었다.

따라서, 계통연계형 태양광발전 시스템에서의 단독운전 방지를 위한 능동검출법 중에서 SFS방식이 비교적 효과적임을 확인할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(R-2002-B-051) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] M. E. Roop, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assisment of The Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 810-816, 1999.
- [2] Hiromu Kobayashi, Kiyoshi Takigawa, "Statical Evaluation of Optimum Islanding Preventing Method for Utility Interactive Small Scale Dispersed PV systems", Proceedings of the IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Convesion(1994), pp. 1085-1088, 1994.
- [3] Kobayashi. H., Takigawa. K., Hashimoto. E., "Method for Preventing Islanding Phenomenon on Utility Grid with a Number of Small Scale PV systems", Twenty Second IEEE PVPS, pp. 695-700, 1991.
- [4] Kiyoshi Takigaya, Hiromu Kobayashi, "Development of Compact and Reliable Protective Control Unit for Grid Connected Small Residential Systems", 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, pp. 491-492
- [5] G. Kern, "SunSine300: Utility Interactive AC Module Anti-Islanding Test Results", Proceedings of the 1997 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA.
- [6] 김용균, 최종우, 김홍근, "디지털 PLL제어의 특성 분석", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 548-553, 2003.
- [7] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, Sponsored by IEEE Standards coordinating Committee 21 on Photovoltaics, Published by IEEE, New York, NY, Apr 2000.
- [8] Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility interactive Power Systems, IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-09: March 2002.