

계통연계형 태양광발전시스템을 위한 단독운전 검출에 관한 연구

이기제, 김 민, 이진섭, 유권중*

삼화기연주식회사 기술연구소, *한국에너지기술연구소

A Study on the Islanding Detection for Grid Connected Photovoltaic System

Gi-Je Lee, Min Kim, Jin-Seop Lee, Gwon-Jong Yu*

SAMWHA Engineering Co., Ltd., *KIER

ABSTRACT

The general ways of the anti-islanding can be classified into the active method and passive method. The passive method which use only the voltage information when power failure occurs has much possibility of the wrong detection. And the active method detects the change of the voltage frequency as instantaneously changing the frequency of the inverter output current.

Therefore, in this paper, the method to inject arbitrary order harmonics into controlled current is proposed. In this method islanding can be detected by measuring the amount of load voltage of injected harmonics order. And as a current control method predictive control method is used, which make actual current accurately to track reference current by instantaneously computing converter output voltage and has fast response in transient state. This parer proposed method was verified by simulation.

1. 서 론

최근 세계적으로 기후변화협약과 에너지 자원의 고갈에 따른 에너지, 환경문제에 대처할 수단으로 대체에너지인 태양광발전에 대한 관심이 집중되고 있다. 태양광발전은 무한정인 태양 빛을 받아 직접 전기를 발생하는 반도체 소자인 태양전지를 이용한 발전 방식으로, 계통의 연계 여부에 따라 계통 연계형과 독립형으로 나눈다. 계통연계형 태양광발전시스템은 인버터의 출력전류를 계통 측의 전압과 동상인 정현파로 제어가 필요하며, 계통의 사고를 검출하여 정지하는 기능이 안전을 위하여 반드시 필요하

다. 계통 측의 사고로서 계통이 정지되었을 경우 또는 전기공사를 하기 위해 계통을 정지시킨 경우에 계통이 개방되었음에도 불구하고 태양광발전시스템의 발전출력과 부하의 전력이 균형을 이루어 시스템이 계통의 이상을 검출하지 못하고 계속 운전하는 현상이 발생하게 되는 데 이를 단독운전(Islanding)이라 한다. 이로 인해 태양광발전시스템으로부터 정지된 계통으로 역전압을 발생시켜 사고를 유발 할 수 있다. 많은 계통에서 안전 때문에 단독운전은 중요한 관심사이다. 단독운전을 방지하기 위한 몇 가지 방법들이 널리 사용되고 있다. 일반적으로 수동적인 방법으로는 전압위상 검출방식, 주파수 급변 검출방식, 고조파 전압 검출방식 등을 들 수 있는데 이 수동적인 방법만으로 단독운전을 검출이 충분하지 않다. 그러므로 능동적인 방식이 사용되는데 이 방식에는 유효전력 변동방식과 무효전력 변동방식 등이 있다.

본 논문에서는 계통에서 고장이 발생하였을 때 고조파 전류를 주입하여 단독운전을 검출하는 방식으로 기본 원리와 주입할 고조파의 주파수 크기 및 부하에 따른 검출 특성 등에 대하여 기술하고 시뮬레이션 결과를 통하여 분석하였다.

2. 기존의 단독운전 검출 방법

단독운전을 방지하기 위한 시스템은 수동적인 방법과 능동적인 방식의 단독운전 방지 기능이 있다. 수동적 방식에는 연계운전에서 단독운전으로 옮겨갈 때의 전압 파형이나 위상의 변화를 감시해 단독운전을 검출하는 것이다. 그리고 능동적인 방식은 항상 인버터에 신호를 보내고 단독운전을 할 경우 그 신호가 변화해 이상을 감지하는 것이다.

그리고, Psc를 시스템 발전출력이라고 하고 PL을 부하소비전력이라고 할 때, 정전시에 부하전력과 태

양전지 어레이 출력간의 관계에 따른 시스템의 운전 특성은 표 1과 같다.^{[1]-[3]}

표 1 부하에 따른 시스템 운전 특성

구분	운전조건	운전 특성	부하조건
CASE1	PL>Psc	부하전압 강하, 전압 또는 주파수 검출	진상, 지상
CASE2	PL<Psc	부하전압 상승, 전압 또는 주파수 검출	진상, 지상
CASE3	PL=Psc	부하전압 변동 없음, 주파수 검출	진상, 지상
CASE4	PL>Psc	부하전압 강하, 전압 검출	순저항
CASE5	PL<Psc	부하전압 상승, 전압 검출	순저항
CASE6	PL=Psc	부하전압 변동 없음, Islanding 발생	순저항

2.1 수동적 방식

전압위상 검출방식은 무효전력에 의하여 발생하는 교류 측의 부하 전압의 위상과 전류의 위상이 변동하는 것을 검출하는 방식으로서 CASE 6의 경우는 검출이 어렵다. 또한 주파수 급변 검출방식은 무효전력에 의하여 발생하는 부하의 전압 주파수가 변동하는 것을 검출하는 방식으로서 역시 CASE 6의 경우는 검출이 어렵다. 고조파 전압 검출방식은 변압기의 여자특성에 의하여 단독운전시에 발생하는 전압의 고조파성분의 급변을 검출하는 방식으로서 CASE 6의 검출이 가능한 방식이다. 따라서 능동적인 방식과 병렬로 많이 쓰이고 있다.

2.2 능동적 방식

유효전력 변동방식은 주기적으로 전류의 양을 변동시켜 유효전력의 양을 변동시켜서 부하전압의 변동을 검출하는 방식으로서, CASE6의 검출이 가능하나 계통이 정상일 때에도 전압의 변동은 어느 정도 있으므로 오동작할 우려가 있다.

무효전력 변동방식은 전류의 주파수를 미소하게 변동시켜 이에 따른 부하단 전압주파수의 변동을 검출하는 방식으로서 전원이 정상일 경우에는 인버터의 출력 전류의 주파수가 변화하더라도 전원전압의 주파수가 일정하지만, 만약 전원이상이 발생하면 전류와 같은 주파수로 부하전압이 변동하게 된다. 이때 부하 전압의 변동하는 주파수를 검출하여 역충전 현상을 방지할 수 있다. 이 방식은 CASE6의 검출이 가능하고 유효전력의 변동방식과는 달리 오동작의 우려는 작다.

3. 고조파 주입방식에 의한 역충전 방지기법

단독운전을 검출하기 위하여 고조파 주입 방식을 제안하였다. 전류제어기가 이상적으로 동작을 할 경우 인버터는 전류원으로 모델링할 수 있고, 전류제어기는 인버터의 출력전류에 임의의 고조파를 주입하여 동작을 시킨다. 따라서 그림 1과 같이 계통연

계시스템을 고조파 모델링할 수 있다.^[4]

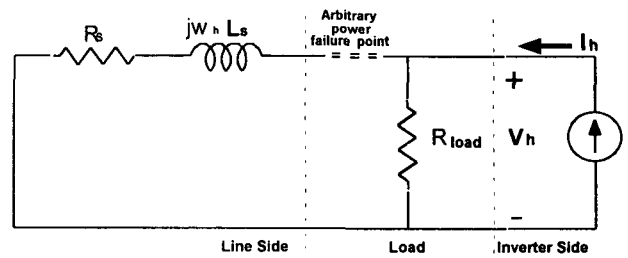


그림 1 계통 및 부하에 대한 고조파 모델

만약 계통이 정상이라면 인버터 쪽에서 바라본 계통의 임피던스는 식 (1)과 같이 매우 작게 보일 것이므로 주입된 고조파 성분은 인버터의 출력단에서 측정하였을 경우 매우 작게 나타날 것이다. 그러나 만약 계통이 고장일 경우 인버터 쪽에서 바라본 계통의 임피던스는 식 (2)와 같이 매우 커진 것으로 보이게 될 것이고 따라서 고조파성분을 인버터 출력단에서 측정하였을 때 교류측 부하임피던스와 전원측 임피던스의 비율로 커진 것으로 측정이 될 것이다.

$$Z_{normal} = \frac{(R_s + j\omega_h L_s) R_{load}}{R_s + j\omega_h L_s + R_{load}} \quad (1)$$

(ω_h : 주입 고조파의 각주파수)

$$Z_{fault} = R_{load} \quad (2)$$

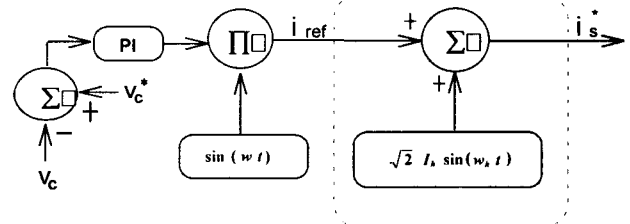


그림 2 고조파 주입

그림 2는 고조파를 전류 제어기에 주입하는 것을 보여주는 블록다이어그램이다. 이 방법은 기본 개념은 매우 단순하고 구현이 용이하기는 하지만 출력전류의 THD를 자칫 크게 할 수가 있다.

독립운전시의 발전시스템의 출력전압의 크기 및 위상은 부하조건에 종속되므로 부하의 특성과 관련지어 이들을 고찰할 필요가 있다. 이를 위하여 인버터의 출력전류와 부하의 임피던스는 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.^{[5] [6]}

$$i_{INV} = I_{INV} \angle 0^\circ \quad (3)$$

$$Z_{LD} = Z_{LD} \angle \theta^\circ = R_{LD} + jX_{LD} \quad (4)$$

여기서, i_{INV} : 인버터 출력전류

- \dot{Z}_{LD} : AC 부하 임피던스
- θ° : 부하의 임피던스 각
- R_{LD} : 부하의 저항 성분
- X_{LD} : 부하의 리액턴스 성분

따라서, 부하전압 및 피상전력은 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_{LD} = I Z_{LD} \angle \theta^\circ \quad (5)$$

$$\dot{S}_{LD} = \dot{V}_{LD} \cdot \dot{I}_{INV} = I_{INV}^2 Z_{LD} \angle \theta^\circ \quad (6)$$

여기서, \dot{V}_{LD} : 인버터 출력단(부하단) 전압

\dot{S}_{LD} : 부하의 피상 소비전력

인버터의 V_{LD} 가 일정한 부하조건을 만들기 위한 인버터의 출력전류의 크기는 다음과 같이 옴의 법칙에 의해서 나타낼 수 있다.

$$I_{INV} = \frac{V_{LD}}{\sqrt{R_{LD}^2 + X_{LD}^2}} \quad (7)$$

위의 식 (4) 및 (7)을 식(6)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 유효전력 및 무효전력으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{S}_{LD} &= P_{LD} + jQ_{LD} \\ &= \frac{R_{LD} V_{LD}^2}{R_{LD}^2 + X_{LD}^2} + j \frac{X_{LD} V_{LD}^2}{R_{LD}^2 + X_{LD}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, P_{LD} : 유효전력

Q_{LD} : 무효전력

부하에서 소비하는 유효전력은 태양전지 어레이에서 공급하는 전력이고 무효전력은 부하와 발전시스템 사이에 주고받는 전력이므로 유효전력에 대해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{LD} = \frac{R_{LD} V_{LD}^2}{R_{LD}^2 + X_{LD}^2} = P_{SOL} \quad (9)$$

여기서, P_{SOL} : 태양전지 발전 출력

정격 순저항 부하를 $R_{RTD} = V_{LD}^2 / P_{SOL}$ 이 R_{RTD} 를 반지름으로 하여 도시한 원에 내접하는 방정식으로 나타내면 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\left(R_{LD} - \frac{1}{2} R_{RTD}\right)^2 + X_{LD}^2 = \left(\frac{1}{2} R_{RTD}\right)^2 \quad (10)$$

여기서, $R_{RTD} = V_{LD}^2 / P_{SOL}$: 정격 순저항 부하

따라서, 본 논문에서는 이의 검출을 위하여 고조파 전류를 주입하고 인버터의 출력단 전압으로 나타나는 고조파의 크기를 다시 검출하여 단독운전을 검출하는 기법이다.

4. 시뮬레이션

계통의 고장과 단독운전검출을 검증하기 위하여 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)를 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

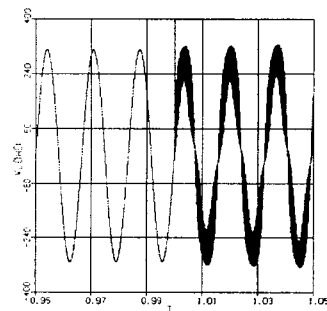
표 2. 시스템 사양

항 목	값
출력	3 [kW]
계통전압	220 [V]
계통주파수	60 [Hz]
샘플링 주파수	20 [kHz]
스위칭 주파수	20 [kHz]
인버터 인덕턴스	8.75 [mH]
직류단 커패시턴스	4.080 [uF]
주입 고조파 전류크기	0.01
주입 고조파 전류 주파수	500
검출필터의 대역폭	5

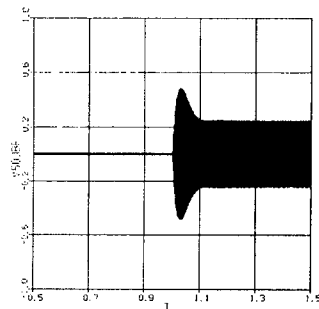
표 3. 부하조건

부하의 종류	역률각	역률
유도성 부하	30	0.87
저항성 부하	0	1.0
용량성 부하	-30	0.87

그림 3은 유도성 부하(역률 0.87)인 경우일 때 계통이 고장시 전압이 변동하지 않는 부하단의 전압파형과 고조파 500MHz 주입했을 때 파형을 나타낸다. 그림 4는 순저항성 부하(역률 1)인 경우 부하단의 전압파형과 검출된 고조파 파형을 나타낸다. 그림 5는 용량성 부하(역률 0.87)인 경우 부하단의 전압파형과 검출된 고조파 파형을 나타낸다. 유도성 및 용량성 부하일 경우 위상 급변에 의한 검출필터의 과도특성이 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 부하단 전압



(b) 검출된 500Hz 고조파전압

그림 3 30° 일 경우(유도성부하)

5. 결 론

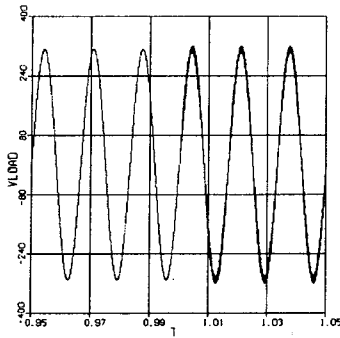
본 논문에서는 태양광발전시스템의 발전특성과 부하에 따른 특성을 고찰함으로써 계통의 이상이 발생할 때 전압이 변동되지 않는다. 그리고 곡선상에 놓이는 유도성부하, 순저항 부하, 용량성 부하에 대하여 전압의 크기 변동 검출만으로는 단독운전을 검출할 수 없음을 보였고 고조파 검출특성을 고찰함으로써 유도성 및 용량성부하의 위상 급변에 의한 검출 필터의 과도특성이 있음을 알아내었다.

본 연구에서는 제안된 기법인 고조파 주입방식만을 이용하여 단독운전 현상을 검출하였으나 기존의 수동적, 능동적 방식과 병렬운전을 하게 되면 검출특성이 더욱 향상될 것으로 예상된다.

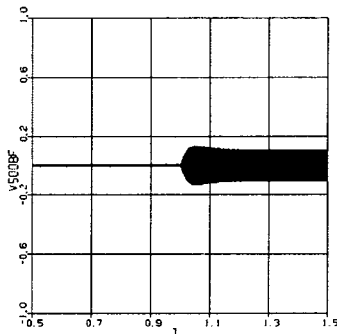
이 논문은 에너지관리공단의 에너지자원기술개발사업(과제번호:2000-T-0006)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

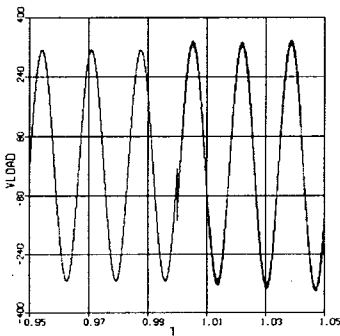
- [1] G. A. Smith, P. A. Onions and D. G. Infield, "Predicting islanding operation of grid connected PV inverter", IEE Proc.-Proc.-Electr. Power Appl., vol. 147, No. 1, Jan. 2002.
- [2] 전력 Peak 절감을 위한 실규모 배전 계통연계형 태양광발전시스템의 실증 실험연구(1), 통상산업부, pp. 45-46, 1996. 2.
- [3] J. Gho, H. Kim, Gyu-Ha Choe, H. Kim and Y. Lee "Design of Anti-Islanding Algorithm for Utility Interactive Photovoltaic System," Proceedings of ICPE, pp.501-504, Oct. 1998
- [4] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 810-816, September 1999
- [5] Ichinose, An equipment for Protecting a Photovoltaic Generation System Connected to a Grid, JIEE, Japan, vol.114-B, no.7/8, pp.715-722, 1994
- [6] Brod, D.W. Novotny, Current Control od VSI-PWM Inverters, IEEE Trans. Ind. 1985.Appl, Vol. IA-21, No4, pp.562-570



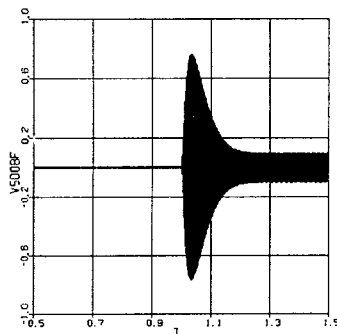
(a) 부하단 전압



(b) 검출된 500Hz 고조파전압
그림 4. 0° 일 경우(저항성부하)



(a) 부하단 전압



(b) 검출된 500Hz 고조파전압
그림 5. -30° 일 경우(용량성부하)