PV 시스템의 계통연계를 위한 새로운 고립운전 방지 알고리즘

*윤중혁, *김흥근, *최종우, 유권종
*경북대학교, 한국에너지기술연구원

A Novel Anti-islanding Algorism for Utility Interconnection of PV System

*Jung-Hyeok Yun, *Heung-Geun Kim, *Jong-Woo Choi, Gwon-Jong Yu
*Kyungpook National University, Korea Institute of Energy Reserch

Abstract - Islanding of PV systems occurs when the uitilty grid is removed but local sources continue to operate and provide power to local loads. Islanding is one of the serious problems in an electric power system connected with dispersed power sources. Also, this can present safety hazards and the possibility of damage to other electric equipments. If the real and reactive power of RLC load and PV system are closely matched, islanding phenomena can't be detected by the passive methods. Several active methods were proposed to detect islanding phenomena. The most effective method is SFS method which was suggested by Sandia National Laboratory. In this paper, a new anti-islanding algorithm is proposed and its validity is verified through simulation and experimental results for utility interconnection of PV system.

1. 서 론

태양광 발전을 포함한 분산전원의 계통 연계를 위해 확보되어야 할 기술은 고립운전 방지기술(Anti-islanding control)이다. 태양광 발전 시스템 및 기타 분산전원이 정전 혹은 사고 등으로 계통에서 분리되었을 때 태양광 발전 시스템의 출력과 배전선 부하의 소비전력이 균형을 이루면 시스템이 배전선 부하를 떠맡아 운전을 계속한다. 이 현상을 고립운전이라 하며 이런 상태가 지속되면 선로 유지보수자의 안전사고를 야기할 수 있으며 전기설비에 나쁜 영향을 줄 수도 있다[1]. 따라서 계통에서 전원공급이 끊겼을 경우 이를 즉각 감지하여 발전을 중단해야 한다.

고립운전 검출기법에는 PCC(Point of common coupling)의 전압이나 주파수를 측정하여 한계치를 벗어나면 고립운전으로 판단하는 수동 검출법과, 출력 전류에 변동을 주었을때 PCC에 나타나는 영향을 측정하여 고립운전을 검출하는 능동 검출법이 있다.

본 논문에서는 새로운 고립운전 검출기법을 제안하고 Matlab 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 고립운전 현상

그림 1은 계통연계형 태양광발전 시스템의 전력 흐름을 나타낸다. 계통에서 전력공급이 중단되어도 수용가로 표현된 RLC병렬 부하에서 LC공진에 의해 PCC전압의 크기와 주파수가 유지되어 고립운전이 발생될 수 있다.

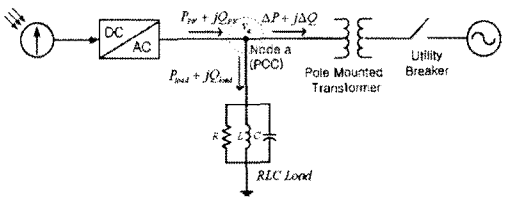


그림 1. PV 시스템과 계통의 전력흐름

PV인버터의 출력전류는 디지털 PLL[2] 을 통해 검출한 PCC 전압의 위상과 일치하도록 제어하므로, PCC의 전압을 V_a 라고 하면 계통으로 유입되는 유효전력 ΔP, 무효전력 ΔQ는 식 (1), (2)와 같다.

$$\Delta P = P_{PV} - \frac{V_a^2}{R} \tag{1}$$

$$\Delta Q = V_a^2\left[\omega C - \frac{1}{\omega L}\right] \tag{2}$$

식 (1), (2)에서 $\Delta P \neq 0$인 상태에서 고립운전이 발생하면 PCC 전압의 크기가 변하게 되고, $\Delta Q \neq 0$인 경우에는 주파수가 변한다. 그리고 $\Delta P = 0, \Delta Q = 0$인 경우에는 PCC전압의 크기와 주파수가 그대로 유지된다. 그런데 IEEE929-2000[3]에서 규정하는 계통의 전압, 주파수 허용변동범위를 적용하면 수동검출법으로 검출할 수 없는 검출 불능 영역(NDZ: Non Detection Zone)이 나타나게 되고 이를 그림 2에 나타내었다.

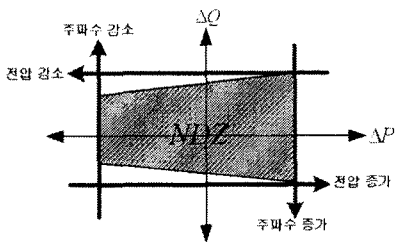


그림 2. 검출 불능 영역

2.2 기존의 능동 검출법

능동 검출법에는 인버터의 출력 전류에 변화를 주어 PCC 전압의 주파수 변동을 측정하여 고립운전 상태를 검출하는 주파수 바이어스 방법과 샌디아 주파수 변동법이 있다. PV인버터는 전류원으로 동작하므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{PV} = I_{PV}\sin(\omega t + \phi_{PV}) \tag{3}$$

그림 3에서 PV인버터의 출력전류에 cf (Chopping fraction)로 정의한 데드타임 구간을 주면 고립운전 발생시 PCC의 주파수가 변한다. 데드타임을 일정하게 인가하는 방법을 주파수 바이어스법이라 한다.

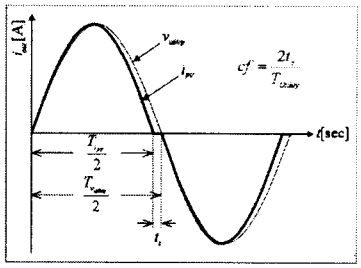


그림 3. 데드타임을 이용한 능동법

PV인버터 출력전류의 기본파 성분은 식 (4)와 같고, PCC 전압과의 위상차는 식 (5)와 같다,

$$i_{PV}(t) = I_{PV}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\cdot cf\right) \tag{4}$$

$$\tan^{-1}\left[R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right] = \frac{\pi \cdot cf}{2} \tag{5}$$

주파수 바이어스법과 수동 검출법을 비교하면 NDZ의 크기는 변하지 않고 ΔQ축의 양의 방향으로 이동하게 되어 수동법의 검출 불능영역 중 일부영역이 검출 가능하게 되나, 검출 가능영역 중 일부영역이 검출 불가능하게 된다. 또한 고립운전 상태가 아니더라도 cf에 의해 출력 전류에 왜곡이 발생한다.

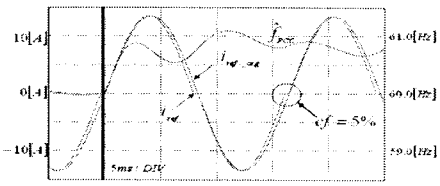


그림 4. 고립운전시 FB방법에 의한 PCC 전압의 주파수 변화

그림 4는 IEEE929-2000에 정의되어 있는 양호도 ($Q = R^*\sqrt{C/L}$)를 2.5로 하여 $P = 2kW$ 인 부하조건에서 $\Delta P = 0$, $\Delta Q \neq 0$인 경우 고립운전 발생시 주파수 바이어스법을 시뮬레이션한 PCC의 주파수이다. 그림에서 i_{ref}는 cf가 인가된 전류지령이고 $\hat{f}_{PCC}$는 PCC의 추정 주파수인데 증가함을 알 수 있다.

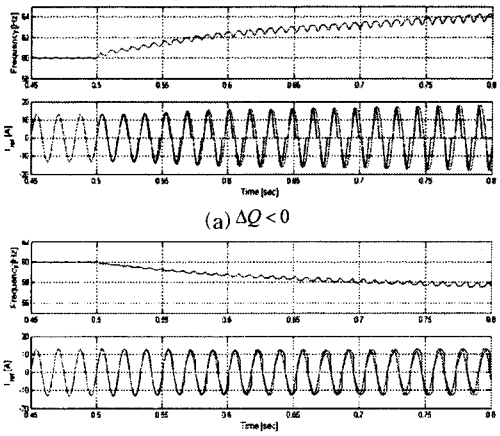
샌디아 주파수 변동법(SFS)은 PCC의 주파수의 변동을 cf에 적용시킴으로써 피드 포워드 효과에 의해 주파수 가 발산하는 것을 이용한 검출방법이다.

식 (6)에서 K는 가속이득, f_a는 PCC의 추정 주파수, f_{line}은 계통주파수(일정)이다.

$$cf = cf_o + K(f_a - f_{line}) \tag{6}$$

고립운전이 발생하면 식 (6)에 의해 cf가 계속 증가(감소)하여 주파수가 발산(수렴)하게 되며 계통의 주파수 변동 한계치를 벗어나면 고립운전으로 판단하여 인버터를 정지시킨다.

그림 5는 $\Delta P = 0, \Delta Q \neq 0$, 공진주파수가 각각 59.3Hz, 60.5Hz인 부하조건에서 고립운전이 발생했을때 샌디아 주파수 변동법을 시뮬레이션한 파형인데, PCC의 주파수가 발산(수렴)함을 볼 수 있다.



(a) $\Delta Q < 0$

(b) $\Delta Q > 0$

그림 5. 고립운전시 샌디아 주파수 변동법에 의한 PCC의 주파수 및 인버터 출력 전류지령

2.3 새로운 고립운전 검출기법

고립운전 상태가 발생하면 인버터의 출력전류의 기준치를 PCC전압에 비해 뒤지거나 앞서게 함으로써 PCC의 주파수가 발산(수렴)하게 하여 고립운전을 검출할 수 있다.

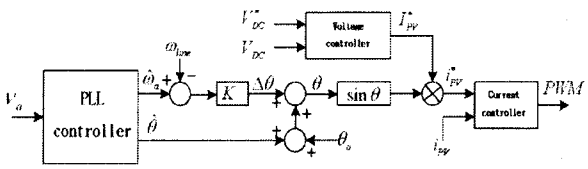


그림 6. 새로운 고립운전 검출 알고리즘

그림 6 은 제안된 고립운전 검출 알고리즘을 보여준다. 인버터의 출력지령은 식 (7)로 표현되며 식 (8)의 $\Delta\theta$에 의해 인버터 출력 전류지령은 앞서거나 뒤진 전류지령을 내보내게 된다.

$$i_{PV}^* = I_{PV}^*\sin(\hat{\theta} + \Delta\theta) \tag{7}$$

$$\Delta\theta = K(\hat{\omega}_a - \omega_{line}) \tag{8}$$

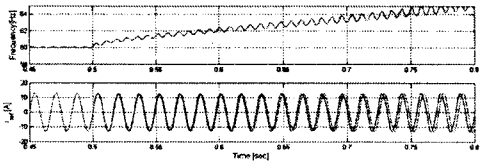
고립운전 상태가 발생되면 인버터 출력 전류지령 i_{PV}^*에 의해 RLC병렬부하에 나타나는 PCC전압은 식 (9)과 같고 ϕ는 식 (10)으로 표현된다.

$$v_a = V_m\sin(\hat{\omega}_a t + \Delta\theta + \phi) \tag{9}$$

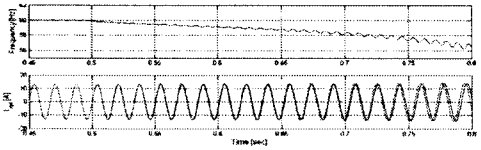
$$\phi = \tan^{-1}[R(1/(\omega_a L) - \omega_a C)] \tag{10}$$

$\hat{\omega}_a = \omega_{line}$ 이면 $\Delta\theta = 0$ 이고 $\hat{\omega}_a \neq \omega_{line}$ 이면 $\Delta\theta \neq 0$ 이므로 PCC의 주파수 $\hat{\omega}_a$가 증가(감소)한다. 결국 $\Delta Q \neq 0$일 경우 가속이득 K 에 의하여 주파수는 계속 증가(감소)하므로 변동 한계치를 넘는 순간 인버터를 정지시킨다

그림 7은 제안된 방법을 사용하여 $\Delta P = 0, \Delta Q \neq 0$ 인 경우 공진주파수가 각각 59.3Hz, 60.5Hz일때 고립운전시 PCC의 주파수가 발산(수렴)하는 모습과 출력 전류지령의 변화를 시뮬레이션한 파형이다.



(a) $\Delta Q < 0$



(b) $\Delta Q > 0$

그림 7. 고립운전시 제안된 방법에 의한 PCC의 주파수 및 인버터 출력 전류지령 변화

2.4 실험

시뮬레이션과 같은 부하조건에서 IEEE929-2000의 절차에 따라 실험하였고, 3kW 계통연계형 PV 인버터를 직접 제작하여 사용하였다.

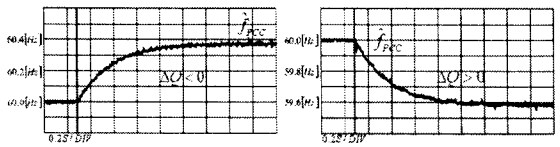


그림 8. 고립운전시 PCC의 주파수변화

그림 8은 고립운전시 PCC의 주파수를 측정한 파형이다. 고립운전시 부하의 LC공진에 의하여 PCC의 주파수가 변하는데, 허용치 이내에 있으므로 수동법으로는 검출 불가능하다.

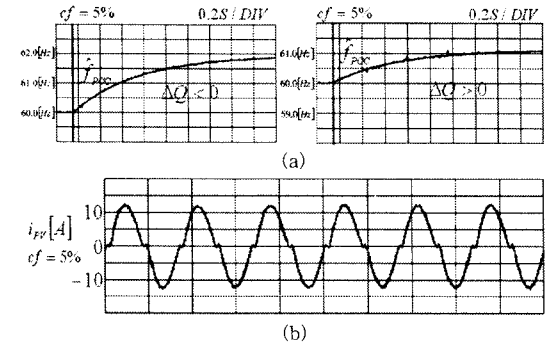


그림 9. (a)FB 방법의 고립운전시 추정 주파수($\hat{f}_{PCC}$)
(b)FB 방법의 PV 인버터 출력전류(i_{PV})

그림 9 (a)는 주파수 바이어스법으로 $\Delta P = 0$, $\Delta Q \neq 0$의 조건에서 실험한 결과이다. 그림 8의 NDZ 영역이 ΔQ축의 양의 방향으로 이동하였음을 알 수 있다. 그림 9 (b)는 출력전류파형인데 데드타임으로 인해 왜곡되었음을 볼 수 있다.

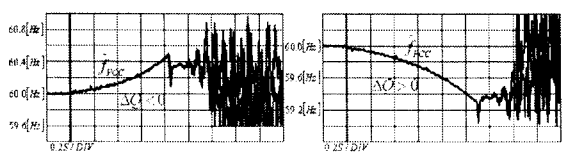


그림 10. SFS 방법의 고립운전 검출

그림 10은 샌디아 주파수 변동법에 의한 고립운전 검출시 PCC의 주파수 변화이다. $\Delta Q \neq 0$일때 주파수가 계속 증가하거나, 계속 감소하여 고립운전을 검출한다.

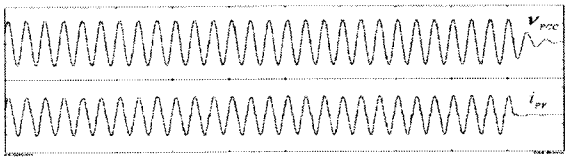


그림 11. SFS 방법의 고립운전 검출시 인버터 출력전류 변화

그림 11은 $\Delta Q < 0$경우 SFS 방법에 의한 고립운전 검출시 인버터 출력전류 i_{PV}의 파형이다. PCC의 주파수가 증가함에 따라 출력전류에 왜곡이 증가한다.

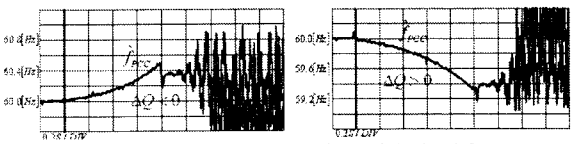


그림 12. 제안된 방법의 고립운전 검출

그림 12는 $\Delta Q \neq 0$일때 제안된 방법에 의한 고립운전 검출시 PCC의 주파수 변화이다.

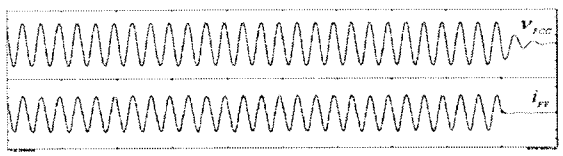


그림 13. 제안된 방법의 고립운전 검출시 인버터 출력전류 변화

그림 13은 $\Delta Q < 0$인 경우 제안된 방법에 의한 고립운전 검출시 인버터 출력전류 i_{PV}이다. 인버터 출력전류의 왜곡없이 고립운전 검출이 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 태양광 발전 시스템의 고립운전현상 및 수동 검출법과 능동 검출법에 대하여 해석하고, 이를 바탕으로 구현이 간단하고 출력 전류에 왜곡이 없는 고립운전 검출법을 제안하였다. 또한 제안된 알고리즘을 기존의 고립운전 검출법중 가장 성능이 우수한 샌디아 주파수 변동법과 비교하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 방법의 우수성과 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 고립운전 검출법은 태양광 시스템뿐만 아니라 다양한 분산전원의 고립운전 검출에도 적용할 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 한국에너지기술연구원(2004-N-PV11-P-02) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

[1]M. E. Roop, 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, 1999.

[2]김용균, 최종우, 김홍근, "계통연계형 태양광발전 시스템의 위상동기화를 위한 디지털 PLL". 전기학회 논문지 53권 9호, pp. 562-568, 2004.

[3] IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, Sponsored by IEEE Standards coordinating Commitee 21 on Photovoltaics, Published by IEEE, New York, NY, Apr. 2000.

[4] Evaluation of Islanding Detection Methods for Photo-voltaic Utility interactive Power Systems, IEA-PVPS Report, IEA-PVPS T5-09: March 2002.