

무효전력 제어를 이용한 새로운 독립운전 방지 기법

최봉주 한양대학교 전자전기제어계측공학과	정진범 한양대학교 전자전기제어계측공학과	김희준 한양대학교 전자·컴퓨터공학부	백수현 동국대학교 전기공학과	이 주 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부	안강순 (주)윌링스 대표
-----------------------------	-----------------------------	---------------------------	-----------------------	----------------------------	---------------------

A Novel Method for Anti-Islanding Using Reactive Power

Bong-Joo Choi\* Jin-Beom Jeong Hee-Jun Kim Soo-Hyun Baek Lee Ju Kang-Soon Ahn  
Hanyang Univ. Dongguk Univ. Hanyang Univ Willings Co., LTD

**Abstract** - An islanding occurs when the utility grid is removed but distributed sources continue to operate and provide power to local loads and grid. This can cause a significant risk to safety and equipment. This report present a novel anti-islanding method to prevent an islanding phenomenon. The proposed method changes the reactive power of the load. Therefore the phase difference between output voltage and current is periodically changed within decided value. When the utility-grid is removed, the frequency of output voltage and current will increase or decrease. And the proposed system will detect the change of frequency and shut down the distributed source. While the conventional methods have some difficulties in detecting particular islanding condition such as a small change in loading, the proposed method can detect most conditions. The performance was verified through experiments.

상태 판단이 불가능하다는 단점이 있다. 발전시스템 자체의 출력량 및 주파수를 주기적으로 변화시켜 독립운전을 검출하는 능동적인 방법은 크게 위상이동 방식과 전력변동방식, 부하변동 방식 등이 있다. 능동적인 방법은 출력을 직접 조절함으로써 계통에 의도하지 않은 영향을 미칠 가능성이 있으나 수동적인 방법에 비해 오동작 가능성이 낮으며 독립운전 현상 발생이전과 작은 차이만을 갖는 경우에서도 신속하고 정확한 판단이 가능하다는 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 능동적인 방법의 일환으로, 태양광 발전시스템 출력의 유효전력성분은 MPPT 제어에 의해 최대값으로 제어되고 무효전력성분만을 주기적으로 미소 변동 시킴으로써 계통 차단시 부하 전압·전류의 주파수 변화를 유도하고, 이를 검출함으로써 독립운전상태를 판단하는 무효전력제어를 통한 독립운전 검출 알고리즘을 제안하였다. 또한 3kW급 태양광 발전용 인버터를 제작하여 그 실험결과로부터 제안한 방법의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 에너지 고갈, 발전사업의 민영화 등의 추세로 인해 에너지·환경 문제가 심각하게 대두되었고 이에 따라 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산전원 보급 및 개발이 활발히 진행되어 왔다. 그중에서도 무한한 발전 가능성과 환경적인 측면에서 가장 이상적인 태양광 발전이 각광받고 있다.

태양광 발전 시스템은 상용 계통과의 연계여부에 따라 독립형과 계통연계형으로 나뉘어지며, 계통연계형의 경우 단방향의 전력흐름만을 허용하던 기존 배전 시스템의 보호 및 운용 관리에 여러 가지 영향을 미치게 된다. 특히, 연계된 계통에서 사고에 의한 차단기의 동작이나 보수를 위해 전력공급의 차단이 이루어진 경우 태양광발전 시스템에 의해 지속적인 전력이 배전계통에 공급된다면 전력품질의 저하 및 계통복구의 어려움, 인명피해, 재계로계전기의 재계로상의 불평형으로 인한 기기손상등 많은 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 계통 전력의 공급여부에 따라 태양광발전 시스템의 독립운전 상태가 신속히 판단되고 제어동작을 통해 계통으로부터 발전시스템을 분리하여야 한다.

시스템의 독립운전 상태를 검출하는 방법은 크게 능동적인 방법과 수동적인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적인 방법은 독립운전현상 발생시 부하의 변동에 의한 전압 및 주파수 변화를 관찰하여 독립운전을 방지하는 방법으로 주파수변화를 검출방식과 전압위상 검출방식등이 있으나, 전력계통에 큰 부하변동이 생기는 경우 주파수 및 전압위상의 변동에 의한 오동작 가능성이 있다. 또한 독립운전 상태시 발전시스템이 담당하는 부하가 독립운전이전에 비해 미소한 변화만이 발생한 경우, 계통상의 주파수나 전압위상변동 또한 변화값이 작으므로 독립운전

2. 본 론

2.1 새로운 독립운전 검출 기법

그림1은 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 전체 구성도를 개략적으로 나타낸 것으로 각 부분에서의 유효 및 무효전력 성분을 표현하였다. 태양광 인버터의 출력은 기본적으로 유효성분만이 존재하도록 출력전류를 제어한다. 따라서 무효성분  $Q_{PV}$ 는 0이 되나 제안한 독립운전 검출 방법은  $Q_{PV}$ 를 유효전력  $P_{PV}$ 의  $\pm 2.5\%$  이내에서 주기적으로 변화시키도록 제어한다. 따라서 부하의 유효 및 무효전력은 다음과 같이 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_{PV} + P_G \\ Q_L &= Q_{PV} + P_G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

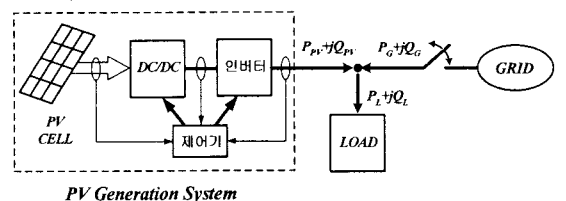


그림 1. 계통 연계형 태양광 발전시스템의 전체 구성도

일반적으로 계통 연계형 시스템에서 계통 차단이전  $P_G=0$  인 경우 차단시 부하전압의 순간적인 상승 혹은

하강이 발생한다. 그리고 이 전압의 변동을 검출하는 과전압보호회로(OVP)나 저전압보호회로(UVP)의 동작에 의해 시스템의 독립운전을 판단할 수 있다. 또한  $Q_G=0$ 인 경우에 계통차단시 부하전압의 순간적인 위상 변동이 발생하고 이 주파수 변화를 검출하여 독립운전을 판단하는 고주파보호회로(OPF)와 저주파보호회로(UFP) 등이 있다. 그러나 이와 같은 전압의 크기와 주파수를 검출하여 독립운전상태를 판단하는 수동적인 방법의 경우 그림 2에 나타난 것과 같이 독립운전을 검출할 수 없는 영역(NDZ-Non Detection Zone)이 폭넓게 존재하는 단점이 있다.

특히  $P_G=0, Q_G=0$ 인 상태에서 차단되었을 경우 부하에서의 변화는 전혀 발생하지 않게 된다. 따라서 NDZ에서의 정확한 검출을 위해서는 인버터 출력에 변화를 주는 능동적 방법이 유리하다. 그러나 능동적 방법은 인버터 출력의 변화에 의한 계통의 다양한 불안정 요소를 야기할 수 있으므로 본 논문에서는 그림 3과 같이 출력의 유효성분은 고정시키고 무효성분을 일정 주기로 미소 변화시켜줌으로써 계통에 미치는 영향을 최소화 하였다. 제안한 검출 방법을 구현하기 위한 알고리즘을 그림 4에 나타내었다. 태양광 인버터가 지니는 MPPT 제어에 의해 출력의 유효전력 성분을 결정하고 유효전력의  $\pm 2.5\%$ 에 해당하는 무효전력 성분을 주기적으로 발생시킨다. 따라서 그림 3에 나타난 것처럼 무효전력에 변화에 따라 피상전력의 크기가 변화하고, 이는 출력 전압과 전류의 위상차를 발생시킬 것이다. 위상차에 의해 발생하는 출력 역률의 변화는 식(2)로 계산된다.

$$PF = \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{Q_{PV}}{P_{PV}} \right) \right\} \quad (2)$$

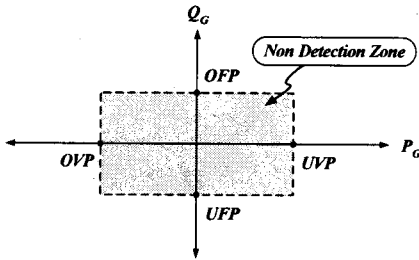


그림 2. 전압 및 주파수 검출을 이용한 수동적 방법

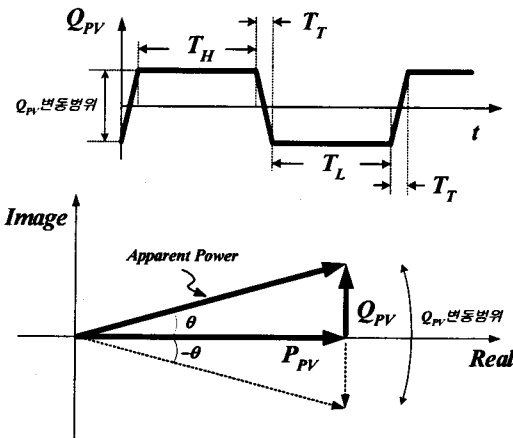


그림 3. 주기적인 무효전력성분 변화에 따른 출력 변화

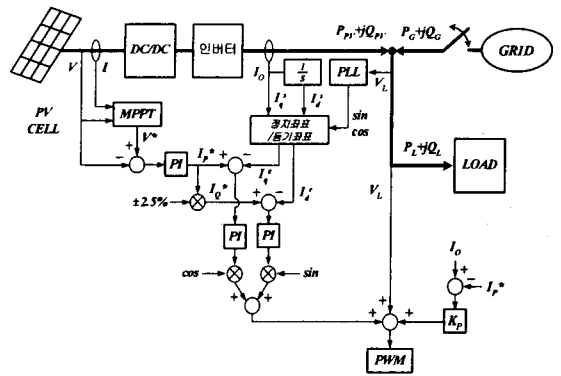


그림 4. 제안한 독립운전 검출법 구현 알고리즘

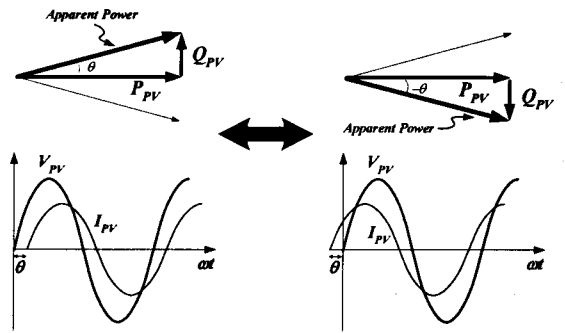


그림 5. 무효전력성분의 주기적 변화에 따른 인버터 출력 전압 및 전류의 위상 변화

무효성분  $Q_{PV}$ 를 유효성분  $P_{PV}$ 의 2.5%로 설정하였을 경우 역률이 가장 낮아지는데 이 경우의 역률을 식(2)에 의해 계산하면

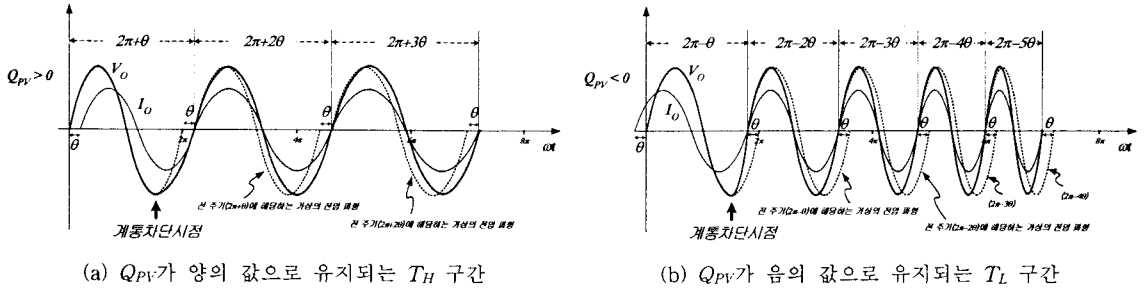
$$PF = \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{2.5}{100} \right) \right\} = 0.9996876 \quad (3)$$

이 된다. 이는 거의 1로서 미소한 무효성분의 변화는 계통에 영향이 없음을 의미한다.

그림 5는 무효전력성분의 변화에 따라 출력전압 및 전류의 위상차가 발생하는 것을 나타낸다. 그림에서와 같이 주기적인 무효전력변화가 있으면, 인버터 출력의 유효전력성분과 부하의 크기와 동일한( $P_{PV}=P_{LOAD}$ ) 독립운전 검출이 가장 어려운 상태에서 계통의 차단이 이루어지면 크게 다음의 세가지 경우로 동작이 분류된다. 해석의 용이성을 위해 부하 임피던스의 위상은 0, 즉 저항성분만으로 이루어진 부하로 가정한다.

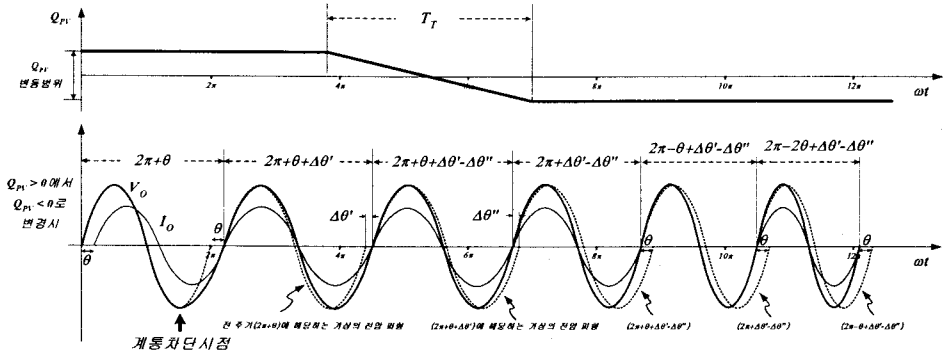
- 1)  $Q_{PV}>0$ 인 경우 ( $|Q_{PV}|=P_{PV}$ 의 2.5%) -  $T_H$  구간
- 2)  $Q_{PV}<0$ 인 경우 ( $|Q_{PV}|=P_{PV}$ 의 2.5%) -  $T_L$  구간
- 3)  $Q_{PV}$ 가 양의 값에서 음의 값으로 변하고 있는 상황, 혹은 그 역의 경우 -  $T_T$  시간 안에 변화

계통 차단시 각각의 경우에 따른 부하 전압과 전류의 변화는 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 독립운전 상태가 되면 부하전압은 인버터 출력 전류에 의해 결정된다. 그러나 제안된 검출법의 제어 알고리즘에 의하여 전 주기 전압 주파수를 기준으로 가상의 다음주기 전압파형이 결정되고 이 가상의 전압에 대해 무효전력성분에 의해 결정된 일정한 위상차  $\theta$ 를 지닌 출력전류가 발생되도록 제어된다.



(a)  $Q_{pV}$ 가 양의 값으로 유지되는  $T_H$  구간

(b)  $Q_{pV}$ 가 음의 값으로 유지되는  $T_L$  구간



(c)  $Q_{pV}$ 가 양의 값에서 음의 값으로 전환되는  $T_T$  구간

그림 6. 계통 차단 시 발생하는 전압전류의 주파수 변화

따라서 시간이 흐를수록 무효전력성분에 의해 지령된 위상차에 해당하는 시간만큼 전압·전류의 주파수가 점점 변화한다. 이 주파수 변화는 OFP / UFP 회로에 의해 검출되고 독립운전상태로 판단되어 태양광 발전 시스템은 동작을 멈추게 된다.

제안한 알고리즘에 의해 그림6의 (a)의 상황에서 독립 운전 검출시까지 요구되는 시간을 계산하여 보면 다음과 같다. 정상상태 주파수는 60Hz, OFP/UFP 회로가 동작하는 주파수는 60.5Hz 이상/ 59.3Hz 이하로 선정하였고  $|Q_{pV}| = P_{pV}$ 의 2.5% 이다.

$\theta$ 의 위상차로 인해 증가하는 시간은

$$\text{위상차 } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{2.5}{100}\right) = 1.432^\circ = 66.3 \mu\text{s} \quad (4)$$

이다. 따라서 59.3Hz 에 해당하는 주기에 도달할 때까지 필요한 과정은

$$\left(\frac{1}{59.3} - \frac{1}{60}\right) \frac{1}{66.3 \mu} = 2.967 \approx 3 \text{ 주기} \quad (5)$$

가 요구되며 이를 시간으로 환산하면

$$\left(\frac{1}{60} - 66.3 \mu\right) + \left(\frac{1}{60} - 2 \times 66.3 \mu\right) + \left(\frac{1}{60} - 3 \times 66.3 \mu\right) = 49.6 \text{ ms} \quad (6)$$

이다. 위 식의 결과로부터 제안한 알고리즘에 의해 독립 운전상태 판단시까지 소요되는 시간은 그림 6의 (a)인 경우 50ms 이내가 되며, 이 결과는 시스템의 제어에

사용된 디지털 제어기의 지연시간을 포함하지 않은 이론적인 시간으로, 제어기의 연산시간 및 동작시간, 스위치에서의 지연 등을 고려하면 계산값보다 5~10배가량 크게 나올 것이다. 또한 차단시의 부하조건, 무효분의 변화 양상 등에 따라 다소 변화가 있을 수 있다. 그러나 이러한 지연시간을 최소화 한다면 알고리즘 상으로는 신속한 독립운전 상태 검출이 가능함을 보여준다고 할 수 있다.

## 2.2 실험결과

무효전력을 이용한 검출법의 유용성을 증명하기 위하여 3kW급의 태양광 발전 시스템을 구성하였다. 그림 7은 인버터 출력단 전압·전류의 파형으로써 역률이 거의 1인 상태로 출력됨을 보여준다.

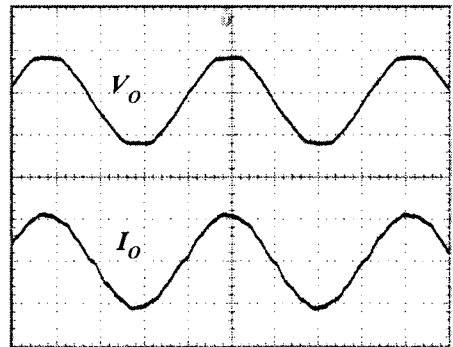
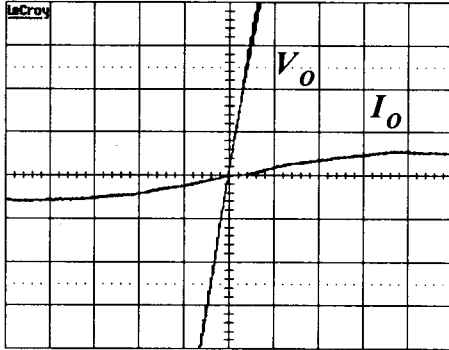
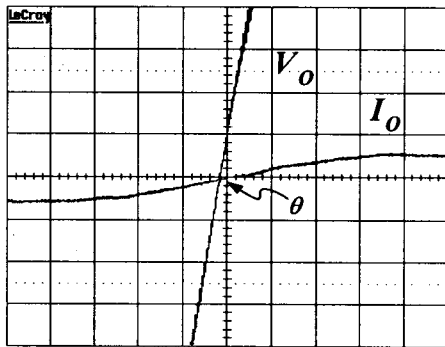


그림 7. 태양광 발전 인버터의 출력 전압 전류 ( $V_o$  300V/Div,  $I_o$  10A/Div, 4ms/div)

그림 8은 인버터 출력의 무효성분 변화에 따라 전압과 전류에 위상차가 발생함을 보여주는 그림이다. (a)는 무효성분  $Q_{pv}=0$ 일 경우로서  $Q_{pv}$ 가 양의 값으로 증가함에 따라 (b)와 같이 위상차가 발생하게 된다. 그러나 발생한 위상차는 미소한 값으로 식(3)에서 계산한바와 같이 출력의 역률에 미치는 영향은 미미하다.



(a) 무효성분  $Q_{pv}=0$  일 때



(b) 무효성분  $Q_{pv}>0$  일 때

그림 8. 무효전력성분 변화에 따른 출력의 위상차 변화 (전압  $V_o$  10V/Div,  $I_o$  20A/Div, 1ms/Div)

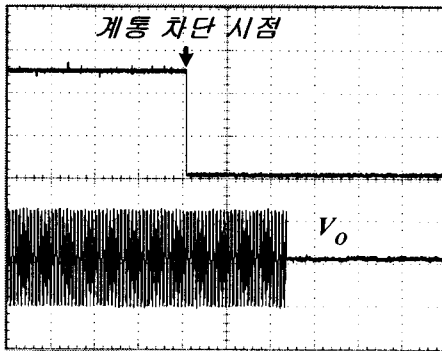


그림 9. 계통 차단시 인버터 출력 전압 파형 (2V/Div,  $V_o$  300V/Div, 200ms/Div)

계통 차단시 제안한 알고리즘이 적용된 3kW급 인버터의 출력 변화를 그림 9에 나타내었다. 그림 상단의 파형은 실험의 용이성을 위해 설계한 계통 연계 차단 신호를 의미하며 그림으로부터 제작한 인버터는 계통차단시

약 500ms 이내에 독립운전상태를 검출, 제어기를 통한 발전 시스템 멈춤 동작까지 이루어짐을 보여준다. 실제 제어기에서의 연산지연 및 스위치들에서 발생하는 지연 시간에 의해 식(6)에 의해 계산된 시간보다 많은 시간이 요구되나 이는 태양광 발전시스템 규격인 1초 이내의 값으로 비교적 신속한 동작이 이루어졌음을 말한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 계통의 차단으로 인하여 태양광 발전시스템이 독립운전상태일 때 이를 검출하는 무효전력성분을 이용한 새로운 방법을 제안 하였다. 제안한 방법은 인버터 출력의 유효전력성분은 MPPT 제어에 의해 제어되며 단지 무효전력성분만을 일정주기로 미소변동시켜줌으로써 인버터 출력 전압·전류의 위상차를 발생시키고 계통차단 시 이로 인한 부하 전압 및 전류의 주파수의 변화가 유도되도록 하였다. 계통에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 유효전력성분의  $\pm 2.5\%$  이내로 무효전력성분의 크기를 제한하였고 이로 인한 출력의 역률변화는 거의 없음을 증명하였다. 또한 실제 3kW급 인버터의 제어기에 적용함으로써 계통차단 시 신속한 독립운전 상태 상태 검출이 이루어짐을 확인하였다.

본 연구는 산업자문부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 장성일, "분산 전원의 고립 운전 검출 기법의 개발", 대한 전기학회, 50A권 11호, pp 506~513, 2001.
- [2] 유권중, "60Hz 절연변압기가 없는 고주파링크 방식 계통연계형 태양광발전시스템 고찰", 전력전자공학회 논문지, 7권 6호, pp, 563~569, 2002.
- [3] 황진수, "분산형전원이 도입된 배전계통에 대한 Islanding Detection Method", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p p 522~524, 2000.
- [4] S. Agematsu, S. Imai, "Islanding Detection System With Active and Reactive Power Balancing Control for Tokyo Metropolitan Power System and Actual Operational Experiences", IEE Developments in Power Protection Conference, No.479, pp 351~354, 2001.
- [5] M.E. Ropp, "Analysis and Performance Assessment Of the Active Frequency Drift Method Of Islanding Prevention", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp, 811~816, 1999.