

계통 연계형 태양광 발전 시스템의 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법

論文

57-1-10

The Anti-islanding Method with Compensation of Load Reactive Power for Grid-connected Photovoltaic Generation System

鄭鎮範* · 申東賢** · 金熙峻†

(Jin-Beom Jeong · Dong-Hyun Shin · Hee-Jun Kim)

Abstract – In this paper, we present an active anti-islanding method with a load monitoring system using reactive power control. The proposed method, which is based on reactive power control, has fewer harmonics components than those in conventional methods, and it can minimize the reactive power component of the grid because it compensates the reactive power component with the load monitoring. The proposed quick islanding detection method was confirmed from the experimental results with an inverter for a 3kW photovoltaic system.

Key Words : Photovoltaic generation system, Anti-islanding, Reactive power control, Reactive power compensation

1. 서 론

현재 우리 일상생활에 사용되는 전기에너지의 대부분은 화력 발전이나 원자력 발전 등에 의존하고 있다. 그러나 화력 발전의 재료가 되는 화석 연료는 점차 고갈되고, 매장량 대부분이 지역적으로 편중되어 있어 자국의 에너지 확보에 앞장선 국가사이에 분쟁 요인이 되고 있으며 공급이 불안정하고 가격변동이 심하여 국가 에너지 수급에 큰 장애가 되고 있다. 게다가 대부분의 에너지원은 공해를 유발하고 지구 온난화의 원인이 되어 생태계를 위협하고 있다.

따라서 선진국에서는 기존 에너지원을 대체할 새로운 에너지원에 대한 연구를 착수하였고, 이미 개발이 상당히 진척된 상태이다. 이와 같이 에너지 확보 및 친환경 에너지 개발 요구가 급격히 증대된 최근의 국제 정서에 발맞추어, 국내에서도 수력, 풍력, 태양광, 연료전지 등의 신·재생 에너지원에 대한 연구 개발이 확산되고 있으며, 그 중에서도 특히 태양광 (PV, Photovoltaic) 발전 시스템은 무한정성, 무공해성, 높은 안정성 측면에서, 경쟁력 있는 에너지원으로 인정받고 있다.

태양광 발전 시스템은 상용계통파의 연계여부에 따라 독립형과 계통 연계형으로 나뉘어진다. 그 중 계통 연계형은 단방향의 전력조류만을 허용하던 기존의 배전계통에 태양광 발전 시스템이 추가됨으로써 배전 계통의 보호 및 운용관리, 품질 등에 다양한 영향을 미치게 된다. 특히 사고에 의한 차단기의 동작이나 계통의 보수를 위한 차단 등으로 계통으로부터 전력공급이 차단되었음에도 태양광 발전시스템에 의

해 지속적인 전력이 배전계통에 공급되는 단독운전 상태는 전력품질의 저하 및 계통 복구의 어려움, 인명피해, 기기의 손상 등을 야기할 수 있다. 따라서 계통 연계형 태양광 발전시스템은 계통 전력의 차단여부에 따라 시스템의 단독운전상태를 인지하고, 제어기를 통해 발전시스템의 신속한 경지가 이루어져야 한다.^[1,5]

단독운전 방지를 위한 기존 인지법들은 크게 수동적 인지법과 능동적 인지법으로 분류할 수 있다. 대부분의 수동적 인지법은 계통 차단시 발생하는 부하 변동에 의한 전압 및 주파수, 위상 변화를 관찰하여 단독운전을 인지하는 방법으로 전압/주파수 인지법, 위상 점프 인지법, 고조파 인지법 등이 있다. 그러나 계통파의 연계가 유지되고 있는 정상상태에서도 전력계통의 큰 부하 변동이 순간적으로 발생할 가능성이 있는데, 수동적 인지법은 이 상황을 단독운전 상태로 오인하는 오동작 가능성이 있다.^[2,4]

이를 방지하기 위해, 전압/주파수 인지법과 같은 수동적 인지법은 단독운전 상태로 판단하는 전압 및 주파수에 약간의 여유를 두기 위해 전압 및 주파수의 허용 범위를 설정한다. 이 허용범위로 인하여 정상상태시 순간적인 전압 혹은 주파수의 변동이 발생하여도, 그 변화량이 허용 범위에 포함되는 경우에는 정상상태로 인지하여 발전 동작을 유지하므로, 오동작 가능성을 현저히 낮출 수 있다.^[3]

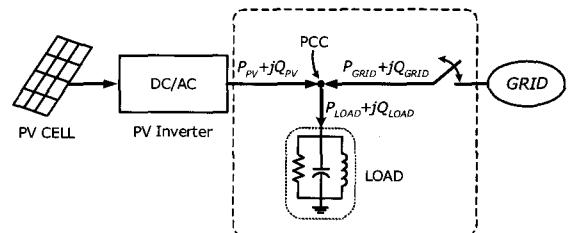


그림 1 계통 연계형 태양광 발전 시스템 구성도

Fig. 1 Configuration of grid-connected photovoltaic generation system

* 正會員 : 自動車部品研究員 電裝技術研究センター・工博

** 正會員 : 漢陽大學校 메카트로닉스工學科 博士課程

† 教신저자, 終身會員 : 漢陽大學校 電子·컴퓨터工學部

教授・工博

E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr

接受日字 : 2007年 10月 17日

最終完了 : 2007年 11月 7日

그러나 계통과 연계된 정상상태에서 태양광 발전 시스템이 담당하는 부하 용량이 계통 분리후에도 거의 변화 없다면, 연계점 전압의 크기, 주파수 및 위상 변화는 미소량만 발생하게 된다. 그리고 이 전압 및 주파수의 미소변화량이 검출영역의 허용 범위에 속하게 되면 태양광 발전 시스템의 단독운전 인지는 불가능하게 된다.

이와 같이 수동적 인지법은 오동작 방지를 위한 허용범위로 인하여 단독운전 인지가 불가능한, 불검출 영역(NDZ, non-detection zone)을 크게 갖게 된다. 따라서 최근에는 이 단점을 보완하기 위해, 태양광 발전 시스템의 출력을 임의로 변화시켜 그에 따른 부하전압 및 주파수의 변화를 관찰함으로써 단독운전을 인지하는 능동적 인지법에 대해 다양하게 연구되고 있다.^[2,3]

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 무효전력 성분을 제어하여 단독운전을 인지하는 무효전력 제어를 통한 단독운전 방지법을 소개하고, 이 방법이 적용된 계통 연계형 태양광 발전 시스템에서 단독운전 인지가 불가능한 상황이 발생할 수 있는 단점을 보완한, 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법을 제안하였다. 또한 3kW급 태양광 발전 시스템을 구성하고, 실험결과로부터 제안한 단독운전 인지법의 유용성을 확인하였다.

2. 무효전력 제어를 통한 단독운전 인지법

본 논문에서 제안한 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법은 태양광 발전 시스템의 출력 중, 유효전력 성분은 최대 전력점 추종 제어법에 의하여 최대값을 갖도록 유지하고, 무효전력 성분을 유효전력의 일정 비율에 해당하는 크기(약 2%~5% 정도)가 되도록 제어함으로써 연계점 전압과 시스템 출력 전류 사이에 위상차를 발생시키는 ‘무효전력 제어를 통한 단독운전 인지법(이하 무효전력 제어법)’을 기본으로 한다.

무효전력 제어법은 시스템 출력에 무효전력 성분을 포함시켜 단독운전을 인지하는 방법으로, 태양광 발전 시스템이 담당하는 부하 변동이 계통 분리 전과 후에 거의 없더라도 단독운전 인지가 가능한 유용한 인지법이다.

무효전력 제어법이 적용된 태양광 발전 시스템의 개략적 알고리즘은 그림 2와 같다. 그림에 나타난 것과 같이 태양전지의 출력전압 V_{CELL} 및 전류 I_{CELL} 을 검출하여, P&O법이 적용된 MPPT 제어를 통해 태양광 발전 시스템 출력의 유효전력 성분을 결정하는 P^* 를 구한다.

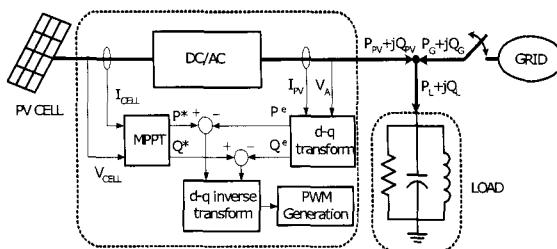


그림 2 무효전력 제어를 통한 단독운전 인지법 개략도

Fig. 2 A simple diagram of anti-islanding method using reactive power control

그리고 P^* 의 일정 비율 K_Q 에 해당하는 크기를 갖는 Q^* 를 계산하는데, 이 값이 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분 Q_{PV} 를 결정하는 기준 파라미터가 된다. 시스템 출력단으로부터 검출된 전압 및 전류를 d-q 변환하여 현재상태의 유효전력 성분 P_e 와 무효전력 성분 Q_e 를 구하고, 이를 기준 값인 P^* , Q^* 와 비교하여 제어함으로써 시스템 내의 인버터를 구성하는 스위치의 펄스폭 변조 신호를 생성한다. 부하가 저항성 부하인 경우 Q_e 는 0이 되므로 Q^* 의 크기가 무효전력 성분을 결정하여, 출력전류 I_{PV} 는 연계점 전압 V_A 의 위상을 기준으로 Q^* 에 해당하는 위상 지연을 갖는 형태로 출력된다. 이 위상 지연으로 인하여 단독운전 인지가 가능하게 되는 것이다.

계통 연계형 태양광 발전 시스템의 출력에 무효전력 성분이 포함되면, 시스템 출력의 유효전력 성분은 최대 전력점 추적 제어에 의해 유지되고 있는 상태이므로 그림 3과 같이 무효전력 성분에 따라 시스템 출력의 피상전력이 변화한다. 따라서 연계점 전압 V_A 와 태양광 발전 시스템의 출력 전류 I_{PV} 사이에 위상차가 발생된다.

양의 크기를 갖는 무효전력 성분에 의한 시스템 출력전류는 PLL에 의해 검출된 연계점 전압의 위상보다 위상차만큼 전류가 늦다. 부하는 임피던스 위상이 0인 상태 혹은 저항성분만 존재한다고 가정하였으므로, 계통이 차단되면 연계점 전압 V_A 는 태양광 발전 시스템의 출력 전류 I_{PV} 와 부하 임피던스의 곱으로 나타나게 되어 V_A 와 I_{PV} 는 동상이 된다.

무효전력 제어법의 알고리즘에 의하면 인버터 출력전류 I_{PV} 는 계통 차단시점 이전의 V_A 주기인 T_0 보다 위상차에 해당하는 시간, Δt 후에 주기가 끝나게 되므로, 매주기마다 Δt 만큼 주기가 증가하게 된다.

따라서 시간이 흐를수록 점점 주파수가 낮아지게 되고 종래에는 저주파 보호회로의 허용 주파수 범위를 벗어나게 되어 보호회로가 동작하게 된다. 저주파 회로의 동작은 시스템이 이상 동작하고 있다고 판단되는 상황이므로, 태양광 발전 시스템의 동작이 즉시 멈추게 된다.

유효전력 성분의 크기는 부하와 동일하나, 양의 크기를 갖는 무효전력 성분이 포함된 태양광 발전 시스템 출력이 단독운전시 저항성 부하에 공급되었을 때 발생하는 주기의 변화를 그림 4와 같다.

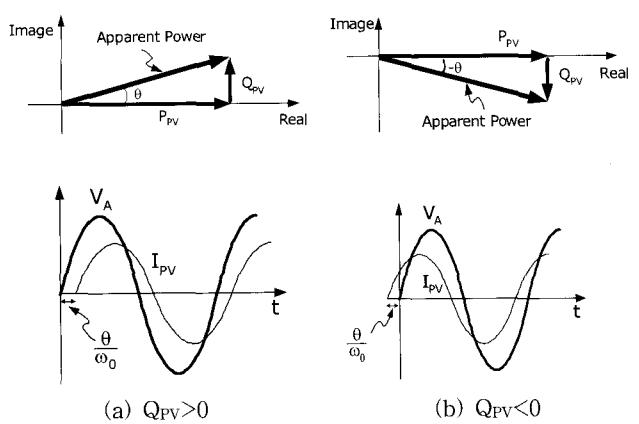


그림 3 무효전력 제어법이 적용된 시스템의 벡터도

Fig. 3 Vector diagram and output waveform of PV system using the reactive power control

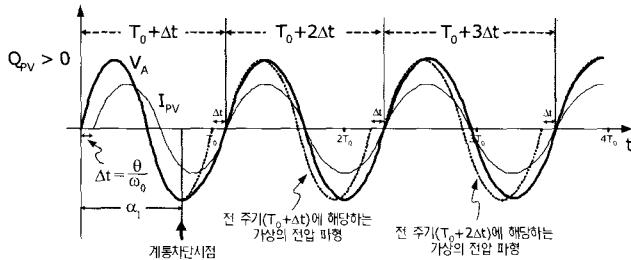


그림 4 $Q_{PV}>0$ 일 때 연계점 전압과 시스템 출력 전류의 변화
Fig. 4 The change of PCC voltage and output current of PV system with positive QPV

태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분 Q_{PV} 가 양의 부호를 가지고 일정 크기 이상 유지되면, 계통 차단시점으로부터 단독운전 판단시까지 요구되는 시간은, 계통 차단 후 증가하는 V_A 의 주기가 저주파 보호회로를 동작 시킬만큼 크게 될 때까지 걸리는 시간으로 구할 수 있다. 단독운전 상태 진입후 N번째 주기에서 저주파 보호회로의 허용범위를 넘어선다고 가정하면, N번째 주기까지 걸리는 총 시간은 식 (1)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} T_{Total} &= T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N = \sum_{n=1}^N T_n = \sum_{n=1}^N (T_0 + n \times \Delta t) \\ &= \frac{N}{2} (T_1 + T_N) = \frac{N}{2} \{ 2T_0 + (N+1) \times \Delta t \} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega_0} = \frac{\theta}{2\pi F_0}$$

이며, V_A 와 I_{PV} 의 위상차를 나타낸다.

부하전압 V_A 의 기본 주파수를 F_0 , 저주파 보호회로에 의해 설정된 최저 허용 주파수를 F_{MIN} 이라고 하면, 단독운전시 V_A 의 주파수는 점점 낮아지면서 F_{MIN} 에 가까워진다. N번째 주기에서 주파수 F_{MIN} 에 도달한다고 할 때, 단독운전 상태가 인지될 때까지 필요한 주기는 식 (2)와 같고, 총 시간 T_{TOTAL} 은 식 (3)과 같이 계산되어 진다.

$$N = \frac{2\pi}{\theta} \times \left(\frac{F_0}{F_{MIN}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_{Total} &= \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{\theta} \times \left(\frac{F_0}{F_{MIN}} - 1 \right) \times \left[\frac{2}{F_0} + \left\{ \frac{2\pi}{\theta} \times \left(\frac{F_0}{F_{MIN}} - 1 \right) + 1 \right\} \times \frac{\theta}{2\pi F_0} \right] \\ &= \frac{\pi}{\theta} \times \left(\frac{F_0}{F_{MIN}} - 1 \right) \times \left\{ \frac{1}{F_0} + \frac{1}{F_{MIN}} + \frac{\theta}{2\pi F_0} \right\} [s] \end{aligned} \quad (3)$$

이와 반대로, 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 출력이 음의 크기를 갖는 무효전력 성분 Q_{PV} 를 포함하면, 그림 3(b)와 같은 괴상전력 벡터도를 지니며, 연계점 전압 V_A 와 출력 전류 I_{PV} 사이에 위상차가 발생하게 된다. 이 위상차는 PLL에 의해 겸출된 연계점 전압의 위상보다 Δt 만큼 전류가 빠르게 나타나도록 한다.

양의 크기를 갖는 경우에서와 마찬가지로 부하는 임피던스 위상이 0인 상태 혹은 저항성분만 존재한다고 가정하면, 계통 차단시 연계점 전압은 태양광 발전 시스템의 출력 전류와 부하 임피던스의 곱으로 표현되어 출력전류와 동상이 된다.

무효전력 성분이 음의 부호를 갖게 되면 태양광 발전 시스템의 출력전류는 계통 차단시점 이전의 연계점 전압이 갖는 주기, T_0 보다 위상차에 해당하는 Δt 만큼 빠른 주기를 가지므로 매 주기가 지날수록 출력전류와 연계점 전압의 주기는 Δt 만큼 짧아지고, 종래에는 고주파 보호회로의 허용 범위를 벗어나는 주파수까지 증가하게 된다.

짧아진 주기를 갖는 연계점 전압이 시스템의 고주파 보호회로를 동작시키면, 시스템은 이를 이상 동작 현상으로 판단하여 발전 동작을 즉시 멈추게 된다. 즉, 주파수 변화를 감지하여 단독운전 상태를 인지한 것이다.

양의 크기를 갖는 경우에서와 마찬가지로 단독운전 인지 시까지 필요한 시간을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{Total}' &= T_1' + T_2' + T_3' + \dots + T_M' = \sum_{m=1}^M T_m' = \sum_{m=1}^M (T_0 - m \times \Delta t) \\ &= \frac{M}{2} (T_1' + T_M') = \frac{M}{2} \{ 2T_0 - (M+1) \times \Delta t \} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$M = \frac{2\pi}{\theta} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_{MAX}} \right)$$

이며, 시스템 출력의 주파수가 F_{MAX} 가 되어 고주파 보호회로가 동작할 때까지의 주기를 나타낸다. Q_{PV} 가 음으로 유지되는 계통 연계형 태양광 발전시스템이 계통과 차단되는 시점으로부터 단독운전이 인지되어 시스템이 정지될 때까지 요구되는 시간을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} T_{Total}' &= \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{\theta} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_{MAX}} \right) \times \left[\frac{2}{F_0} - \left\{ \frac{2\pi}{\theta} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_{MAX}} \right) + 1 \right\} \times \frac{\theta}{2\pi F_0} \right] \\ &= \frac{\pi}{\theta} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_{MAX}} \right) \times \left\{ \frac{1}{F_0} + \frac{1}{F_{MAX}} - \frac{\theta}{2\pi F_0} \right\} [s] \end{aligned} \quad (5)$$

그림 4와 5의 a_1 , a_2 는 첫 주기내에서 계통 차단이 이루어진 시점까지의 시간으로, 상황에 따라 0~ T_0 내의 값을 지닌 유동적인 시간이 된다. 또한 매 주기의 시작점에서 출력전류의 주기를 결정하게 되므로, 단독운전 진입과 동시에 연계점 전압은 전류와 동위상이 되고 전압의 주기는 곧바로 Δt 만큼 증가하거나 감소하여 다음 주기 가상 전압파형에 영향을 준다. 따라서 단독운전 상태가 어느 시점에서 발생하였지 a_1 과 a_2 의 값이 변화할 뿐 기본 동작에 영향을 미치지는 않는다. 그러므로 a_1 , a_2 는 충분히 작은 시간으로 가정하여 이론적 해석시 무시하였다.

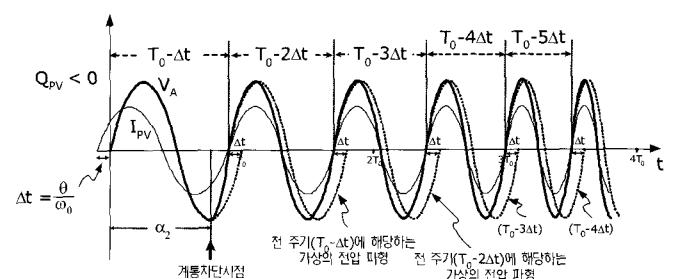


그림 5 $Q_{PV}<0$ 일 때 연계점 전압과 시스템 출력 전류의 변화
Fig. 5 The change of PCC voltage and output current of PV system with negative QPV

3. 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법

계통 연계형 태양광 발전 시스템의 출력의 무효전력 성분을 일정하게 유지하여 단독운전을 인지하는 무효전력 제어법은 부하에 무효전력 성분이 포함되어 있는 경우에서는 단독운전 인지가 불가능할 수도 있다.

부하에 무효전력 성분이 존재하게 되는 경우, 태양광 발전 시스템에서 단독운전 인지를 목적으로 공급하는 무효전력 성분 Q_{PV} 와 부하의 무효전력 성분 Q_{LOAD} 가 거의 비슷하거나 완벽히 동일하면 단독운전 인지가 어렵게 된다. 무효전력 성분 크기가 조금이라도 차이가 있다면 연계점 전압의 주기가 조금씩 변화하게 된다. 그러나 그 변화량이 미미하여 저주파/고주파 보호회로의 허용 범위를 벗어나기까지는 많은 시간이 요구되게 된다. 계통 연계형 태양광 발전 시스템에 관련된 규격에 의하면 최소 0.5초 이내에 단독운전 인지가 가능해야 하므로, 무효전력 성분의 크기가 비슷하면 단독운전 인지는 가능하나 신속하지 못하여 규격을 벗어날 가능성이 많다. 특히 무효전력 성분이 완벽하게 동일하면 단독운전 상황이 되더라도 주파수 변화는 전혀 발생하지 않게 된다. 따라서 무효전력 성분이 존재하는 부하의 경우에는 단순하게 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분을 일정하게 유지하는 방법을 사용하기 어렵다.

그러므로 태양광 발전 시스템이 단독운전 상황에서 무효전력 성분이 존재하는 부하를 담당하는 경우에서도 단독운전 인지가 원활하게 이루어지도록, 태양광 발전 시스템 출력의 무효전분을 시간에 따라 주기적으로 변화시키는 방법이 사용된다.

무효전력 성분이 일정 주기로 변화되게 되면, 단독운전 진입시 부하의 무효전력 성분과 크기가 동일한 상황이더라도 일정시간이후에 시스템 출력의 무효전력 성분 크기가 변하므로 연계점 전압 주파수의 변화가 발생하게 된다.

이와 같이 무효전력 성분을 주기적으로 변화시킴으로써 무효전력 성분이 존재하는 부하에서도 단독운전 인지가 가능하도록 할 수 있다.

예를 들면, 그림 6(a)에서와 같이 부하에 무효전력 성분이 존재하여, 태양광 발전 시스템 출력이 무효전력 성분 Q_{PV} 를 지니더라도 그 크기가 부하의 무효전력 성분 Q_{LOAD} 와 동일하면 계통 차단이 이루어져도 전압, 전류의 위상차는 변하지 않는다.

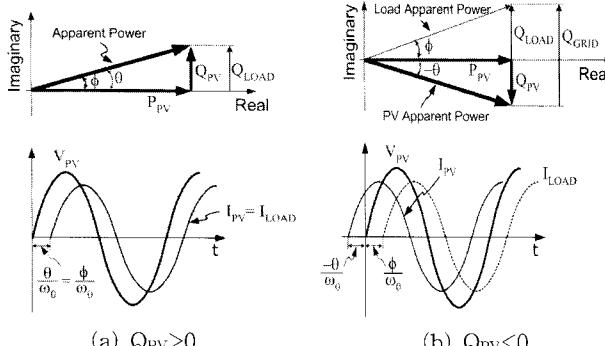


그림 6 무효전력 성분을 갖는 부하에서의 무효전력 제어법

Fig. 6 The phase plot of PV system using the reactive power control method ($Q_{LOAD}>0$)

그러나 시간이 지나 그림 6(b)와 같이 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분의 부호가 반대가 되면, 전압과 전류 사이에 위상차가 발생하고, 제어 알고리즘에 의해 점차 주기가 짧아지거나 길어지게 되어 단독운전 인지가 가능하게 된다.

이와 같이 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분을 주기적으로 변동시키는 방법이 효과적으로 사용되기 위해서는 주의해야 할 점이 있다.

첫 번째는 무효전력 성분의 변동 주기가 너무 길게 설정된 경우이다. 계통 차단이 발생하였음에도 위상차의 변화가 없는 그림 6(a)의 상황이 너무 길게 나타나면, 그림 6(b)와 같이 단독운전 인지가 가능한 상황이 되더라도 계통 차단시부터 단독운전 인지 후 시스템 정지까지 시간이 규정 시간을 초과할 수 있다. 따라서 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분이 변동되는 주기가 너무 길어져서는 안 된다.

이와 반대로 무효전력 성분의 변동 주기가 너무 짧은 경우에도 문제점이 발생한다. 예를 들어 계통 차단시 그림 4와 같이 양의 Q_{PV} 에 의하여 점차 주기가 증가하고 있는 상황에서 Q_{PV} 가 음의 값으로 바뀌게 되면 이미 증가된 주기로부터 Δt 만큼 주기가 짧아지게 된다. 그런데 무효전력 성분의 변동주기가 너무 짧아서, 점차 감소중인 전압 및 전류의 주기가 저주파 보호회로(UFP Circuit)를 동작시키기 전에 다시 Q_{PV} 의 부호가 양으로 바뀌게 되면 단독운전 인지는 불가능하게 된다. 따라서 양 혹은 음의 무효전력 성분을 갖는 상황이 충분히 단독운전 인지가 가능하도록 어느 정도 길게 유지될 필요가 있다.

또 다른 문제점은 무효전력 성분이 주기적으로 변동되는 경우 계통측에 미치는 영향이 커질 수 있다는 것이다. 앞서 논의된 것과 같이 무효전력 성분이 주기적으로 변동되는 주기를 설정하는 것이 용이치 않으므로, 신속한 단독운전 인지가 가능하도록 무효전력 성분의 크기를 키워 인지감도를 높이게 된다. 게다가 그림 6(b)에서 알 수 있듯이 계통이 담당하게 되는 무효전력 성분 Q_{GRID} 는 Q_{PV} 와 Q_{LOAD} 의 합으로 나타나게 되고, 계통이 담당하는 유효전력 성분 P_{GRID} 는 태양광 발전 시스템이 MPPT 제어에 의해 부하의 P_{LOAD} 와 동일한 크기의 P_{PV} 를 출력하므로, P_{GRID} 는 매우 작다. 결국, 계통측에서 보는 태양광 발전 시스템을 포함한 부하의 역률은 매우 낮아지게 되고, 태양광 발전 시스템의 무효전력 성분과 부하의 무효전력 성분에 대한 부담이 상대적으로 커지게 되며, 계통 전체의 효율이 저하되는 문제점이 있다.

이와 같이 태양광 발전 시스템 출력에 무효전력 성분을 포함시킴으로써 단독운전을 인지하는 무효전력 제어법은 부하에 무효전력 성분이 존재하는 경우, 개선될 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 무효전력 성분으로 인해 발생하는 문제점을 완화시키기 위하여 부하의 무효전력 성분을 태양광 발전 시스템이 부담함으로써 계통에 미치는 영향을 최소화하면서도 신속한 단독운전 인지가 가능한 부하 무효전력 보상이 적용된 개선된 단독운전 인지법을 제안하였다.

제안한 방법은 앞서 서술한 부하에 무효전력 성분이 포함된 경우를 고려하여 주기적으로 무효전력 성분을 변동시키는 무효전력 제어법을 기반으로 한다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법은 무효전력 성분을 주기적으로 변동시킴에 있어, 기준이 되는 시스템 제어기 내의 무효전력 성분 지령치 Q^* 의 값을 다음과 같이 결정한다.

$$Q^* = Q_{LOAD} \pm (P_{PV} \times K_Q) \quad (6)$$

따라서 그림 7과 같이 부하의 무효전력 성분 Q_{LOAD} 에 해당하는 위상차 ϕ 를 기준으로 주기적 변동을 하게 된다. 그러므로 전체적인 위상차 θ 는 $\theta=\Theta+\phi$ 가 되며, 정상 상태시 계통측으로부터 유입되는 무효전력 성분도 식 (7)과 같아진다.

$$Q_{GRID} = \pm (P_{PV} \times K_Q) \quad (7)$$

그림 7과 같이 제어되는 시스템에서는 부하의 무효전력 성분을 태양광 발전 시스템이 부담하게 됨으로써 계통에서 유입되는 무효전력 성분을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 부하의 무효전력 성분을 보상한 상태이기 때문에 저항성 부하에서뿐만 아니라 유도성 부하 혹은 용량성 부하 모두에서 신속한 단독운전 인지가 가능하다. 이는 부하의 무효전력 성분 Q_{LOAD} 를 포함한 Q_{PV} 값이 출력됨으로써, 앞서 서술한 무효전력 제어법의 저항성 부하에서의 상황인 그림 4와 5처럼 주기가 Δt 만큼 증가하거나 감소하게 되기 때문이다. 단지 그림 4, 그림 5와는 다르게 초기 위상차가 $\theta=\Theta+\phi$ 로 나타나는 점만 다르다. 그러나 이 차이점은 제어 알고리즘에 의해 주기가 Δt 만큼 증가 혹은 감소하는 상황에 영향을 미치지 않는 요소이다.

결국, 어떤 부하에서든지 단독운전 인지시까지 요구되는 시간은 저항성 부하에서의 값, 식 (3) 혹은 식 (5)의 값이 되어, 매우 신속한 단독운전 인지가 가능하게 된다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법의 유용성을 확인하기 위해 3kW급의 태양광 발전 시스템을 구성하였다. 실험에 사용된 시스템은 그림 8과 같이 태양전지의 전압, 전류 특성을 갖도록 프로그램 된 전원장치(DC power supply)와 제안한 단독운전 인지법이 적용된 태양광 발전 시스템용 인버터(PV inverter), 무효전력 성분이 최소화 되도록 구성된 저항부하(Load), 계통에 해당하는 AC 전원 공급부(AC source)로 구성되어 있다.

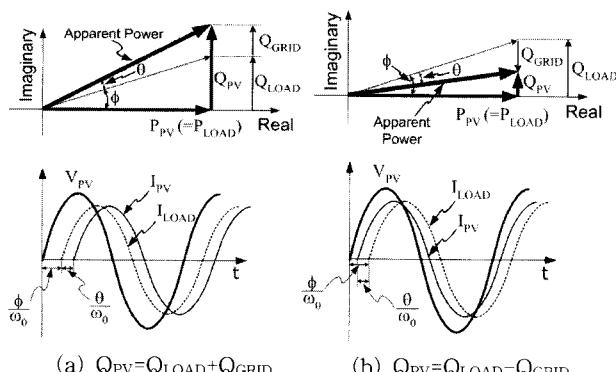


그림 7 부하 무효전력 보상을 갖는 단독운전 인지법이 적용된 태양광 발전 시스템의 벡터도

Fig. 7 Vector diagram of PV system using the reactive power compensation method of load

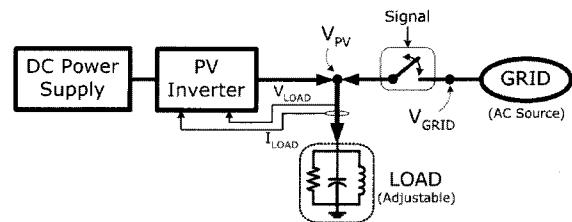


그림 8 실험에 사용된 시스템 구성도

Fig. 8 Configuration of PV system for an experiment

계통 차단은 신호 인가시 ON 되는 스위치를 이용하여 계통과 연결시킴으로써, 신호 제거시 계통 차단이 이루어지도록 하였다.

그림 9는 부하의 무효전력 성분이 거의 0인 저항부하 상황에서 태양광 발전 시스템 출력의 무효전력 성분이 양의 값을 갖는 경우에서의 단독운전 인지 실험 결과이다. 그림 9는 유효전력 성분 크기의 약 5%정도의 무효전력 성분을 포함시킨 상황으로, 계통 차단시점에서부터 점차 시간이 지남에 따라 부하 전압 파형의 주기가 계통 전압에 비해 증가하게 되어, 점차 두 전압 파형 사이에 위상차가 발생하는 것을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 그리고 증가된 주기는 결국 저주파 보호회로(UFP)를 동작시켜, 계통 차단으로부터 약 100ms 정도 지난 시점에서 시스템 동작이 정지됨을 알 수 있다. 이는 태양광 발전 시스템에 관련된 규격보다 매우 빠른 결과로, 태양광 발전용 인버터의 출력에 포함된 무효전력 성분의 크기를 크게 하면 더 빨라질 수 있다. 그러나 무효전력성분은 사용소자의 요구 사양을 상승시키고 출력 역률을 저하시키므로 대략 5%이내의 값을 갖는 것이 좋다.

그림 9와는 달리 부하가 저항성 부하가 아닌 약 30Var의 무효전력 성분을 포함하는 경우, 그림 10과 같이 단독운전 인지시까지의 시간이 늘어나게 된다.

이는 태양광 발전 시스템에 포함된 무효전력 성분 중 일부분은 부하의 무효전력 성분에 의해 상쇄되어 매 주기마다 증가되는 주기의 변화량이 그림 9에 비해 감소하기 때문이다. 따라서 UFP 회로를 동작시키기까지 요구되는 시간이 증가하게 되는 것이다.

그러나 본 실험에서는 부하의 무효전력 성분이 작고 인버터 출력의 무효전력성분이 약간 크게 설정된 관계로 규격보다 짧은 시간내(약 180ms)에서 단독운전 인지가 가능하였다.

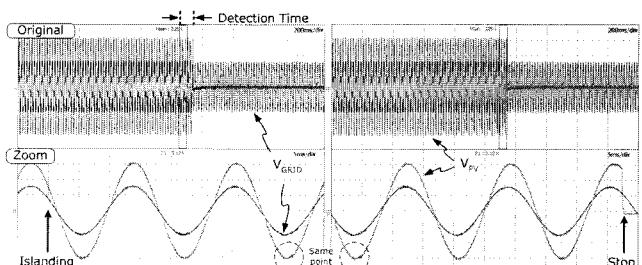


그림 9 무효전력 제어법이 적용된 시스템 파형 ($Q_{LOAD}=0$)

Fig. 9 The output waveform of system using the reactive power control ($Q_{PV}>0$). V_{PV} :100V/div, V_{Grid} : 200V/div, Original: 200ms/div, Zoom: 5ms/div

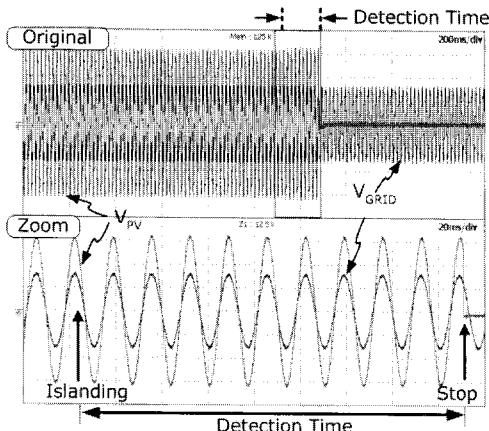


그림 10 무효전력 제어법이 적용된 시스템 파형 ($Q_{LOAD}>0$)
Fig. 10 The output waveform of system using the reactive power control($Q_{PV}>0$). V_{PV} :100V/div, V_{Grid} : 200V/div, Original: 200ms/div, Zoom: 5ms/div

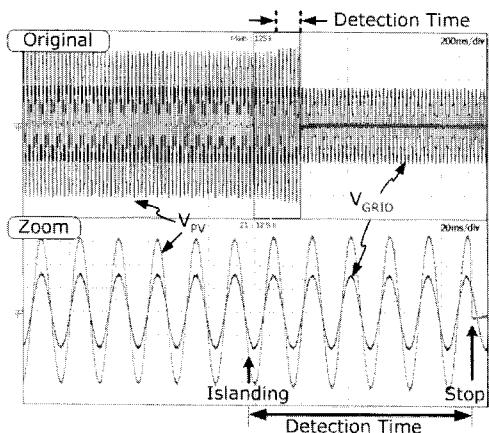


그림 11 부하 무효전력 보상을 갖는 단독운전 인지법이 적용된 태양광 발전 시스템의 출력 파형 ($Q_{LOAD}>0$)
Fig. 11 The output waveform of system using the reactive power compensation method of load ($Q_{PV}>0$). V_{PV} :100V/div, V_{Grid} : 200V/div, Original: 200ms/div, Zoom: 5ms/div

하지만 그림 10의 결과로부터 단순한 무효전력 제어법은 부하의 무효전력 성분에 따라 단독운전 인지의 가능성과 인지 시간이 변동될 수 있음을 충분히 알 수 있다.

그림 11은 이러한 무효전력 제어법을 개선하여 부하의 무효전력 성분을 태양광 발전 시스템이 보상하여 줌으로써 부하에 상관없이 신속한 단독운전 인지가 가능하도록 하는 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법이 사용된 경우의 실험결과이다.

그림 11의 실험 결과는 부하가 갖는 무효전력 성분을 태양광 발전 시스템이 보상함으로써 단독운전 인지에 요구되는 시간이 그림 10에 비해 현저히 감소하여 그림 9의 결과와 거의 동일함을 보여준다. 즉, 제안된 제어법이 부하의 무효전력 성분을 보상하여 줌으로써 무효전력 성분을 갖는 부하에서도 신속한 단독운전 인지가 가능한 매우 유용한 방법임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 부하의 무효전력 성분을 태양광 발전 시스템이 보상하여 줌으로써 신속한 단독운전 인지가 가능한 부하 무효전력 보상이 적용된 단독운전 인지법을 제안하였다. 제안한 방법은 무효전력 성분이 포함된 부하가 단독운전 진입시 단독운전 인지가 불가능할 수 있는 문제점을 지닌 무효전력 제어법을 개선한 방법으로, 부하의 무효전력 성분을 보상함으로써 계통에 미치는 영향을 최소화 하고, 계통의 무효전력 부담을 경감시키는 이점이 있다. 또한 부하에 무효전력 성분이 존재하는 용량성, 유도성 부하에서도 신속한 단독운전 인지가 가능하다. 그러나 태양광 발전 시스템이 부하 무효전력 성분을 보상함에 따라, 시스템에 사용되는 소자의 전압 및 전류 정격이 증가되는 원인이 될 수 있으므로, 무조건적인 무효전력 보상은 불가능하다. 따라서 제안한 방법은 소용량이며 0.9이상의 역률특성을 갖는 일반 가정용 태양광 발전 시스템에서 가장 큰 이점을 나타낼 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] ASIMINOAEI, L., TEODORESCU, R., BLAABJERG, F., and BORUP, U.: 'A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection', IEEE Tran. on Power Electronics, Nov. 2005, Vol. 20, Issue 6, pp. 1480-1490.
- [2] HUNG, G.K., CHANG, C.C., and CHEN, C.L.: 'Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters', IEEE Tran. on Energy Conversion, March 2003, Vol. 18, Issue 1, pp. 169-173.
- [3] AGEMATSU, S. and IMAI, S.: 'Islanding detection system with active and reactive power-balancing control for the Tokyo metropolitan power system and actual operational experiences', IEE Developments in Power Protection Conf., 2001, 479, pp. 351-354.
- [4] ROOPP, M.E., BEGOVIC, M., and ROHATGI, A.: 'Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention', IEEE Tran. on Energy Conversion, 1999, Vol. 14, Issue 3, pp. 810-816.
- [5] WOYTE, A., BELMANS, R., and NIJS, L.: 'Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters' IEEE Tran. on Energy Conversion 2003, Vol. 18, Issue 1, pp. 157-162.

저자 소개



정진범 (鄭鎭範)

1976년 생. 2001년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전자전기제어계 측공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 현재 자동차부품연구원 선임연구원

TEL : 041-559-3298

E-mail : jbjjeong@katech.re.kr



신동현 (申東賢)

1973년 생. 1999년 성균관대학교 기계공학과 졸업. 2001년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사). 2006년~현재 한양대학교 메카트로닉스공학과 박사과정. 현재 자동차부품연구원 전임연구원

TEL : 041-559-3170

E-mail : dhshin@katech.re.kr



김희준 (金熙峻)

1954년 생. 1976년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 일본 큐슈대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1987년~현재 한양대학교 전자·컴퓨터 공학부 교수.

TEL : 031-400-5164

E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr