

3상 계통연계형 태양광 PCS의 단독운전검출을 위한 개선된 무효전력변동기법

이 기옥*, 정 영석**, 소 정훈**, 유 병규**, 유 권중**, 최 주엽*, 최 익*
 *광운대학교, **한국에너지기술연구원

Improved RPV (reactive-power-variation) anti-islanding method for grid-connected three-phase PVPCS

K.O. Lee*, Y.S. Jung**, J.H. So**, B.G. Yu**, G.J. Yu**, J.Y. Choi*, I. Choy*
 *Kwangwoon Univ, **Korea Institute Energy Research

Abstract - As the grid-connected photovoltaic power conditioning systems (PVPCS) are installed in many residential areas, this has raised potential problems of network protection on electrical power system. One of the numerous problems is an Island phenomenon. There has been an argument that because the probability of islanding is extremely low it may be a non-issue in practice. However, there are three counter-arguments: First, the low probability of islanding is based on the assumption of 100% power matching between the PVPCS and the islanded local loads. In fact, an island can be easily formed even without 100% power matching (the power mismatch could be up to 30% if only traditional protections are used, e.g. under/over voltage/frequency). The 30% power-mismatch condition will drastically increase the islanding probability. Second, even with a larger power mismatch, the time for voltage or frequency to deviate sufficient to cause a trip, plus the time required to execute the trip (particularly if conventional switchgear is required to operate), can easily be greater than the typical re-close time on the distribution circuit. And, third, the low-probability argument is based on the study of PVPCS. Especially, if the output power of PVPCS equals to power consumption of local loads, it is very difficult for the PVPCS to sustain the voltage and frequency in an island. Unintentional islanding of PVPCS may result in power-quality issues, interference to grid-protection devices, equipment damage, and even personnel safety hazards. So the verification of anti-islanding performance is strongly needed.

In this paper, the authors propose the improved RPV method through considering power quality and anti-islanding capacity of grid-connected three-phase PVPCS in IEEE Std 1547 ("Standard for Interconnecting Distributed Resources to Electric Power Systems"). And the simulation and experimental results are verified.

1. 서 론

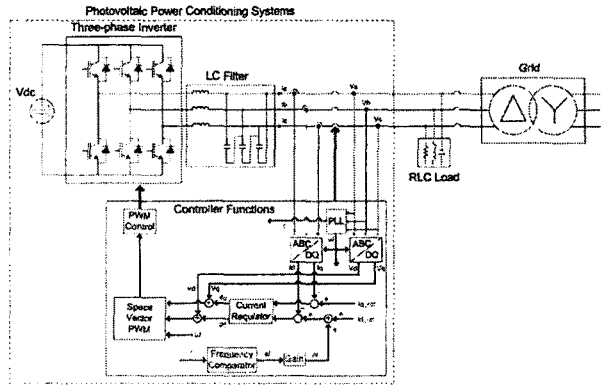
청정에너지원인 태양광을 이용하여 전력을 생산하는 태양광시스템의 설치가 우리나라를 포함하여 세계적으로 증가하는 추세이다. 태양광 시스템의 형태는 크게 독립형과 계통연계형으로 구분되는데, 독립형은 계통이 없는 낙도나 소용량(5kW이하)의 배터리 충전기 등의 시스템이고, 계통연계형은 태양광 어레이에서 변환된 전기에너지를 계통으로 연계하는 형태이다. 이러한 계통연계형 태양광시스템은 소규모 분산전원으로써 그 설치 현황은 해마다 독립형 시스템에 비하여 비약적으로 증가하는 중이다^[1]. 현재 우리나라에 설치되는 계통연계형 시스템의 용량에 따른 계통의 형태는 주로 3~5kW의 소용량에서는 계통의 3상(u,v,w)중 하나의 상에 연계되는 단상시스템으로 설치되고, 10kW 이상의 대용량에서는 3상에 연계하는 시스템이 설치되고 있다.

이러한 계통연계형 태양광 시스템에서 거론되는 주요 쟁점은 최대출력추종기법, 출력전류 직류분검출 및 방지기법, 단독운전방지기법 등이 있다. 그 중 단독운전은 태양광 시스템이 일사량에 따라 생산하는 출력전력과 전력연계점에 연결되어 있는 지역부하의 소비전력이 정확히 일치하였을 때 전력계통에 사고 및 유지 보수에 의한 정전이 발생하여도 이를 태양광시스템이 검출하지 못하고, 전력연계 동작을 유지하고 있는 상태를 말하는데, 본 논문에서는 이 단독운전을 검출하기 위한 기법 중 3상 시스템에 적용할 수 있는 무효전력변동기법에 대하여 단독운전시험의 국제 규격인 IEEE Std. 1547의 시험을 기준으로 기존의 무효전력변동기법이 갖고 있던 취약점을 개선한 기법을 제시하고, 그 유효성을 Psim 시뮬레이션 툴을 이용하여 제시한 기법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

3상 계통연계형 태양광용 PCS는 주로 DC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, LC Filter 및 제어회로 등의 네 가지로 구성된다. 논문에서는 태양광용 PCS에 필수적인 최대전력추종기법을 DC-DC 컨버터가 이상적으로 수행하고, 컨버터와 인버터 사이의 DC Link의 전압을 일정하게 제어한다면 DC-AC 인버터의 입력전압인 DC Link 전압을 이상적인 전압원으로 대체할 수 있으므로, 논문에서는 그림 1과 같이 입력전압을 이상적인 전압원으로

로 가정하였고, 시뮬레이션에 사용한 3상용 H-bridge의 스위칭 기법은 공간벡터 변조기법을 사용하였다.



〈그림 1〉 3상 계통연계형 태양광용 PCS의 구성도, 지역부하 및 계통연계도

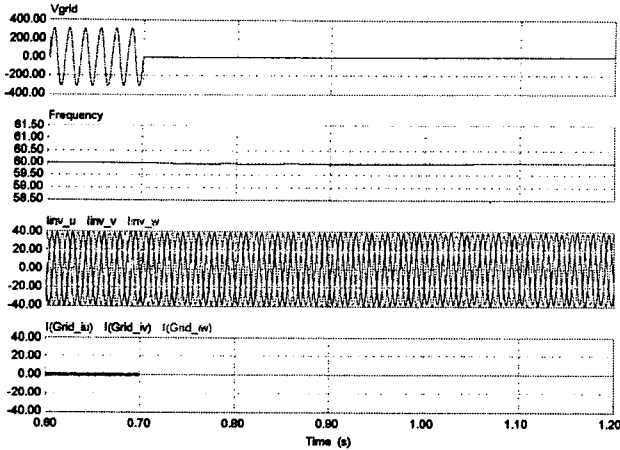
3상 태양광용 PCS의 단독운전 시험조건 및 방법은 국제 규격인 IEEE Std. 1547의 규격에 의한 시험방법을 채택하였는데, 단독운전 시험 규격에 부합하는 RLC 공진부하값, 3상 연계형 태양광 PCS의 기본적인 파라미터와 배전계통전압의 파라미터 등을 표 1에 나타내었다. IEEE Std. 1547은 전력변환장치를 이용한 분산전원시스템에 대한 규정으로써, 단독운전시험에서 중요한 파라미터인 품질계수 Q_f (quality factor)가 1인 RLC 공진부하가 병렬로 연결된 상태에서 단독운전 시험을 한다. 품질계수 Q_f 의 정의는 식 (1)과 같고, 품질계수 Q_f 가 기존의 IEEE Std. 929-2000에서 정한 2.5에서 1로 낮아진 이유는 단독운전 발생 시 능동적 검출기법에서 인가하는 왜란의 크기가 작아도 충분히 주파수를 가변시킬 수 있어 전력품질 측면에서 유리하기 때문이다^[2].

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \tag{1}$$

〈표 1〉 PV PCS, RLC Load, Grid의 파라미터

PV PCS		RLC Load		Grid	
F_s	10 kHz	R	14.1376 Ω	V_{ac}	220 V _{rms}
V_{dc}	450 V	L	37.49 mH	F_{line}	60 Hz
L_f	3 mH	C	187.62 μF		
C_f	20 μF	Q_f	1		
P_{rated}	10 kW				

단독운전방지기법은 크게 수동적기법과 능동적기법으로 구분 할 수 있다. 수동적기법은 연계형 시스템의 전압, 주파수, 위상 등의 값이 단독운전이라고 판단 할 수 있는 기준값 이상으로 변화했을 경우 이를 이용하여 단독운전을 검출하는 기법으로 정의 된다. 하지만 이러한 수동적기법은 그림 2와 같이 태양광 시스템의 발전 전력과 부하의 소비전력이 일치하는 평형일 경우나 특히 RLC 공진 부하가 연결된 경우에는 계통전압의 크기와 주파수의 변동이 발생하지 않기 때문에 단독운전의 검출이 불가능하다^[3]. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 기법이 능동적기법으로 이는 시스템의 출력전류(주파수, 위상 및 크기 등)를 변동시킴으로써 시스템의 발전 전력과 부하의 소비전력의 평형을 깨도록 하고, 지속적으로 계통전압의 주파수를 가속 또는 감속하도록 하여 단독운전을 검출하는 기법으로 크게 출력전력 변동 방식, 주파수 쉬프트 방식 등이 있다. 본 논문에서는 앞에서 언급한 방식 중에서 3상 시스템에 적용하기가 용이한 출력전력변동 방식의 무효전력변동기법에 대하여 기존의 문제점을 개선한 기법을 제시한다^[4].



〈그림 2〉 단독운전 현상

2.1 무효전력변동기법

$$i_{pv,a} = I_a \sin(\omega_{pv}t + \theta_{pv}) \quad (2)$$

단상 및 3상 계통연계형 태양광 PCS의 출력을 계통측에서 보면 전류원처럼 동작하기 때문에 PV PCS의 출력 전류를 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 단, 식 (2)는 3상 연계형 태양광 PCS의 출력 중 한 상에 대한 표현이다. 여기에서 I_a 는 출력전류의 크기, ω_{pv} 는 출력전류의 주파수, θ_{pv} 는 출력전류의 위상이다. 출력전력 변동 방식은 위의 세 개의 파라미터 중 하나에 지속적인 변동을 인가하는 기법이다. 그 중 무효전력의 지령값을 변동하여 출력전류의 위상인 θ_{pv} 를 변동시키는 무효전력 변동기법은 발전전력과 부하소비전력이 평형이 되었을 경우에 단독운전 발생 시 위상 변동에 의해 (무효전력 크기의 변동) 전력의 평형상태를 효과적으로 깨뜨리고, 그 후 지속적으로 전압의 주파수를 가속 또는 감속시키어 OFR(과주파수 계전기) 또는 UFR(저주파수 계전기)을 이용하여 단독운전을 검출하는 기법이다. 하지만 이 기법은 다수의 인버터가 같은 배전계통에 병렬로 연결된 경우에는 그 효과가 감소되고, 설치된 인버터에 동일한 무효전력변동기법이 적용되었다고 가정하면 각 인버터의 무효전력변동의 방향과 시점이 서로 동기되지 않는 한 이 왜란이 서로 상쇄되어 그 효과가 저하될 가능성이 있다. 이는 무효전력의 변동량을 주기적으로 투입하던 방식을 이용했기 때문에 발생하는 결과이다^[5].

이러한 다수의 인버터가 연계되어있는 경우에서도 무효전력변동기법을 사용하기 위한 방법으로는 무효전력을 주기적으로 투입하던 방식이 아닌 무효전력의 양과 방향을 그림 1에서 보는 바와 같이 PLL(phase-locked-loop)에 의하여 계산된 계통전압의 주파수와 기준 주파수 사이의 오차(Δf)가 무효전력의 지령값 I_{d-ref} 에 가감되도록 하는 것이 제안하는 무효전력 변동기법의 주요 원리이다. 이를 위해서는 태양광용 PCS가 계산하는 계통전압의 주파수가 매우 정밀해야하며, 또한 반영되는 이득은 정상상태에서 역률의 악화를 최소화 할 수 있어야 하며, 단독운전 시에는 충분히 단독운전을 검출할 수 있을 만큼의 주파수 변화가 발생할 수 있는 이득의 설계가 중요하다. 태양광 PCS가 계산해 내는 계통전압에 대한 주파수의 오차식은 식 (3)과 같다.

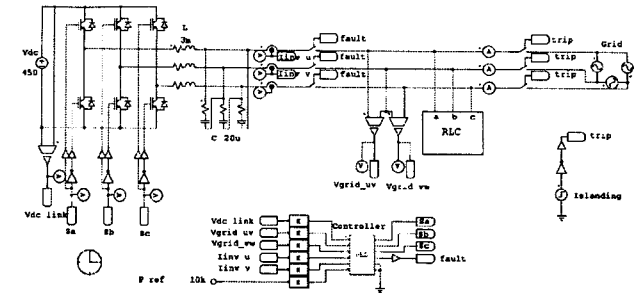
$$\Delta f = f_{cut} - f_{grid} \quad (3)$$

위의 식에서 f_{cut} 는 시스템이 계산하는 계통전압의 주파수이고, f_{grid} 는 계통전압의 기준값이다(60Hz). 주파수의 오차에 따라 무효전력량을 가감하는 방법은 계산되는 주파수가 기준 주파수보다 큰 값으로 계산되어 오차(Δf)가 양의 값을 가지게 되면, 이로 인한 Δf 를 무효전력의 기준값인 I_{d-ref} 에 더해지도록 하여, 주파수를 더욱 가속시키는 방향으로 하고, 그 반면에 계산되는 주파수가 기준 주파수보다 작은 값으로 계산되면 오차(Δf)도 음의 값을 가지게 된다. 이로 인한 Δf 를 무효전력의 기준값인 I_{d-ref} 에 더해지도록 하여 주파수를 더욱 감속시키는 일종의 정제환 루프이다. 이를 이용하여 반영된 이득은 정상상태의 주파수 오차로 인하여 계산되는 무효전력의 양이 유효전력의 5% 정도가 되도록 계산을 하였다^[5].

2.2 시뮬레이션

10kW급 3상 연계형 태양광 PCS의 단독운전 시뮬레이션을 위한 회로를 그림 3과 나타내었다. 우선 그림 3과 같이 회로의 구성은 실제의 연계형 인버터와 동일한 구조로 나타내었으며, 제어는 Psim의 DLL블록을 이용하였다. 이 DLL블록은 여러 가지 인버터의 제어에 필요한 공간벡터 스위칭 시간의 계산, 무효전력변동기법, 주파수 계산, 위상 검출 및 연계제어 등을 수행한다. 만약 단독운전이 발생하여 제어블록에서 계산하는 계통전압의 주파수가 60.5Hz이상 또는 59.3Hz이하로 변하면 이를 단독운전으로 판단하고, 적절한 Trip 제어신호를 발생하도록 하여 전력변환동작을 정지하는 동시에 계통으로부터 태양광 PCS를 분리 할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션에서 단

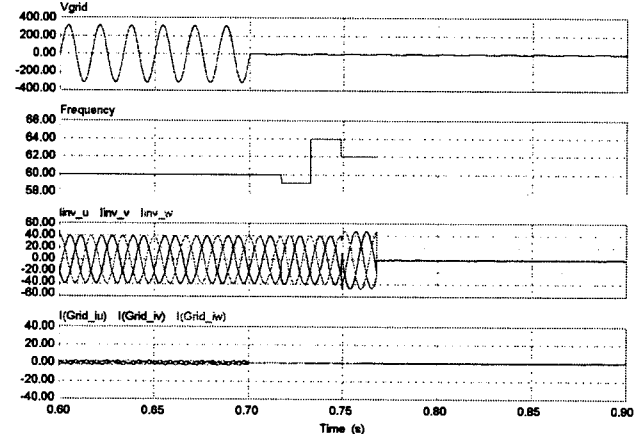
독운전 발생은 0.7sec에서 발생하도록 하였다.



〈그림 3〉 3상 연계형 PCS의 단독운전 시험용 Psim 모델

2.3 시뮬레이션 결과

다수의 3상 연계형 태양광 인버터가 병렬로 계통에 연결된 경우에도 적용할 수 있는 개선된 무효전력변동기법을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 부하의 설정은 IEEE 1547의 시험규격에 의하여 10kW 출력에 부하하도록 계산하였다(표 1 참조). 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같이 단독운전 발생(0.7sec)후 약 50ms후에 계통전압의 주파수가 60.5Hz이상으로 변동하고, 이를 단독운전에 의한 주파수 이상으로 판단하여 인버터의 전력변환동작이 정지되고, 계통으로부터 분리된 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 개선된 무효전력변동기법의 단독운전시험결과

3. 결 론

본 논문에서는 단독운전검출기법 중에서 3상 계통연계형 태양광 시스템에 쉽게 적용할 수 있는 개선된 무효전력변동기법을 제안하고, 그 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 이 개선된 기법은 기존의 무효전력변동기법이 갖고 있는 단점인, 다수의 인버터가 같은 배전계통에 병렬로 연결된 경우, 단독운전의 검출성능이 저하될 가능성을 제거하기 위해 제안되었으나, 이득의 설정에 따라 배전계통이 정상인 상태에서도 태양광 시스템이 계산하는 계통전압의 주파수 오차에 따라 출력전력의 품질(역률)을 악화시키는 영향을 끼치기 때문에 이를 해결하기 위해서는 매우 정밀한 주파수의 계산이 필요하다는 점과 배전계통에서 단독운전이 아닌 정상적으로 허용되는 주파수의 변동(59.3Hz~60.5Hz)에 매우 민감하다는 단점을 갖고 있다. 앞으로 동일한 배전계통에 연계되는 3상 계통연계형 태양광 PCS가 많아질 것으로 예상되므로, 이러한 multiple inverter case에 대한 타당성의 검증이 미비하므로 앞으로의 연구가 필요하다.

〈참고 문헌〉

- [1] 유권중, 이기욱, 최주엽, "태양광 발전시스템 보급동향", Journal of the KARSE, 제 23권 제 1호, pp.83~90, 2006년 1월
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std 1547, 28 July 2003
- [3] M. E. Ropp, "DESIGN ISSUES FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS," Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, October 12, 1998
- [4] 김주대, "3상 계통연계형 태양광 발전 시스템을 위한 새로운 단독운전 검출기법", 석사학위 청구논문, 2003년 2월
- [5] 정영석, 유권중, 최주엽, 최재호, "3상 계통연계형 인버터의 단독운전 검출기법 고찰", 전력전자학술대회 논문집, vol. 2, pp.761~764, 2003