

# DPLL을 이용한 능동적 단독운전방지를 위한 무효전력변동법

이기옥\*, 유병규\*\*, 유권종\*\*, 최주엽\*, 최 익\*\*\*

\*광운대학교 전기공학과(skalrl@nate.com),  
\*\*한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터(bgyuyu@kier.re.kr),  
\*\*\*광운대학교 정보제어공학과(skalrl@nate.com)

## Reactive Power Variation Method for Anti-islanding Using Digital Phase-Locked-Loop

Lee, Ki-Ok\*, Yu, Byung-Gu\*\*, Yu, Gwon-Jong\*\*, Choi, Ju-Yeop\*, Choy, Ick\*\*\*

\*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skalrl@nate.com),  
\*\*Korea Institute of Energy Research(bgyuyu@kier.re.kr),  
\*\*\*Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University(skalrl@nate.com)

### Abstract

As the grid-connected photovoltaic power conditioning systems (PVPCS) are installed in many residential areas, these have raised potential problems of network protection on electrical power system. One of the numerous problems is an Islanding phenomenon. There has been an argument that it may be a non-issue in practice because the probability of islanding is extremely low. 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 islanding 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 sufficiently to cause a trip, plus the time required to execute a trip (particularly if conventional switchgear is required to operate), can easily be greater than the typical re-close time on the distribution circuit. 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 islanding. Unintentional islanding of PVPCS may result in power-quality issues, interference to grid-protection devices, equipment damage, and even personnel safety hazards. Therefore the verification of anti-islanding performance is strongly needed. In this paper, improved RPV method is proposed through considering power quality and anti-islanding capacity of grid-connected single-phase PVPCS in IEEE Std 1547 ("Standard for Interconnecting Distributed Resources to Electric Power Systems"). And the simulation results are verified.

Keywords : 태양광 전력변환기(PV PCS), 단독운전(Islanding), 무효전력변동(Reactive Power Variation), 디지털 위상잠출(Digital Phase-Locked-Loop), 단독운전방지법(Anti-Islanding Method)

접수일자 : 2008년 03월 28일, 심사완료일자:2008년 04월 16일  
교신저자 : 이기옥(skalrl@kier.re.kr)

## 기 호 설 명

$I_{nv_{ref}}$	: PVPCS의 인버터 출력전류 지령치 (A)
$I_{p_{ref}}$	: 유효분 전류 지령치 (A)
$I_{q_{ref}}$	: 무효분 전류 지령치 (A)
$G_{AI}$	: Anti Islanding 이득

## 1. 서 론

향후 가까운 미래에 정부에서 주도하고 있는 10만호 보급사업 등을 포함한 대규모 태양광발전산업의 보급에 따라 특정지역에서는 계통연계형 태양광 전력변환기(PV PCS)의 고밀도 연계가 예상된다. 이 때 지금까지는 이론적으로만 가능할 것으로 여겨졌던 현상인 단독운전 현상이 발생할 수 있는 확률이 높아지게 된다. 특히 많은 가구에서 집단적으로 태양광발전시스템을 운용할 경우 PV PCS의 출력전력과 수용가의 소비전력이 평형을 이루게 되면, 계통이 상실되어도 연계점 전압의 실효값 및 주파수가 변동하지 않기 때문에 PV PCS가 이를 감지하지 못하고 전력변환운전을 계속하는 단독운전이 발생하게 되는 것이다. 만약 단독운전 현상이 발생하면, 전력계통의 유지보수 인력에 대하여 심각한 위협과 계통시스템의 재폐로 시 전력기기 및 부하기기의 손상이 예상된다. 따라서 PCS가 이러한 단독운전 발생 시 이를 신속히 검출하고, 계통연계 동작인 전력변환운전을 정지하여 배전계통의 사고에 대한 안전성 및 신뢰성 확보가 절실하게 필요하게 되었고, 단독운전을 검출하기 위한 단독운전 검출기법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 기존에 제안된 수동적 단독운전 검출기법으로 출력전력과 부하의 소비전력의 불균형에 의하여 발생하는 계통전압의 위상 변화를 감지는 전압위상 급변 검출기법과 계통전원이 정상일 경우에 계통전원이 담당하던 주상변압기의 여자 전류를 단독운전 발생시 PCS가 담당하게 되어 발생하는 전압의 제 3고조파

의 성분을 감시하는 제 3고조파 검출기법 등이 있다. 그리고 능동적 검출기법에는 PCS가 출력전류의 위상에 변화를 주어 연계하는 slip mode frequency shift기법 및 출력전력을 변동시키는 전력변동기법, 출력전류의 주파수를 계통전압의 주파수와 다르게 하여 연계하는 주파수 바이어스 기법 등이 있다.<sup>1)</sup> 본 논문에서는 전력변동기법 중 하나인 무효전력변동기법에 대하여 단독운전검출 성능을 향상시키기 위한 한 방법으로 Digital Phase-Locked-Loop(DPLL)의 주파수계산을 이용하여 그 효용성을 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

## 2. 무효전력변동방지 기법

단독운전검출기법의 종류를 분류한다면 능동적 기법과 수동적 기법으로 나눌 수가 있는데, 두 기법 모두 계통전압의 실효값과 주파수의 변화에 이상이 발생하면 이를 감지하여 PV PCS를 정지시키는 방법을 기본적으로 사용한다. 이 능동적 기법 중의 하나인 무효전력변동기법(reactive power variation)은 PCS가 무효전력을 계통으로 투입하여 단독운전 발생 시 주파수의 변동이 발생하도록 하여 전력변환을 정지시키는 기법이다.<sup>2)</sup> 본 논문에서는 단상 계통연계형 PV PCS의 인버터 전류 지령을 식 (1)과 같이 계산하여 제어하도록 설정하였다.

$$I_{nv_{ref}} = I_{p_{ref}}\sin(\omega t) + I_{q_{ref}}\cos(\omega t) \quad (1)$$

유효분 전류지령치( $I_{p_{ref}}$ )는 PV PCS의 MPPT(최대전력추종기법) 알고리즘에 의하여 태양광어레이에서 최대전력이 발전될 수 있도록 계산되는 지령치이고, 무효분 전류 지령치( $I_{q_{ref}}$ )는 출력전력의 역률에 영향을 주어 단독운전시 전력평형상태를 깨기 위한 것으로 그 변동량을 인가하기 위한 방법으로는 유효전력량, 주파수변동량, 무효전력량 등에 따라 반영시키는 등이 있다. 본 논문에서는 이 무

효전력에 해당하는 무효분 전류지령치의 변동을 식 (2)와 같이 기준 주파수( $f_{ref} : 60Hz$ )와 PCS가 자체 계산하는 계통전압의 주파수( $f_{cal}$ )의 오차에 이득( $G_{AI}$ )을 곱하여 인가하는 방법을 사용하였다.

$$I_{qref} = G_{AI} \times (f_{ref} - f_{cal}) \quad (2)$$

계통전압의 주파수를 계산하기 위한 대표적인 방법으로는 영점검출 방식이 있는데, 이 방식으로 계통전압의 주파수를 계산하게 되면, 샘플링 주파수가 높을수록 주파수 분해능이 정밀해 질 수 있다. 그러나 현실적으로 DSP 기반의 PV PCS에서는 PWM제어를 위한 제어 루프의 계산 시간으로 인하여 그 샘플링 주파수를 수 백kHz 이상으로 높이기 어렵다. 또한 계통전압의 한 주기에 한번씩 주파수값이 계산됨으로 1~3의 카운터 오차값을 이용하여 단독운전을 검출하기 위해서는 매우 큰 무효분 전류지령치가 인가되어야 함으로 무효전력변동기법의 이득( $G_{AI}$ )이 매우 커야한다. 이는 단독운전이 아닌 상태에서 불필요하게 출력전력의 품질을 훼손할 가능성이 있다. 결국 단독운전을 효과적으로 검출하기 위해서는 매 제어주기마다 계통전압의 위상과 주파수를 계산할 수 있는 All Pass Filter를 이용한 DPLL<sup>3)</sup>을 사용하였다.

### 3. Digital Phase-Locked-Loop의 설계 및 특성

단상 계통연계형 PV PCS에서 사용되는 위상검출기법은 영점검출 방식과 계통전압을 이용하여 가상의 상 전압을 생성하여 계통전압과 가상의 전압을 비교하여 그 위상을 추종하는 DPLL이 있다. PSIM 시뮬레이션을 이용한 가상의 전압 생성은 그림 1과 같이 All Pass Filter를 이용하여 계통전압( $V_{a\_grid}$ )에 비해  $90^\circ$ 진상인 가상의 전압( $V_b$ )를 생성하여 사용하였는데, 그 결과는 그림 2와 같다.

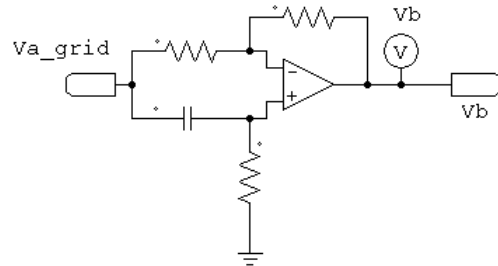


그림 1. All Pass Filter

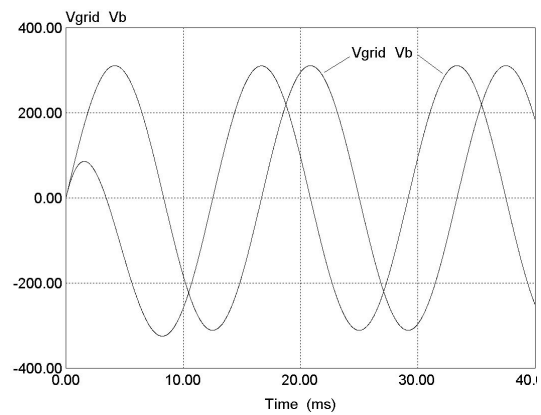


그림 2. 계통전압과  $90^\circ$ 진상인 가상의 전압

DPLL의 제어블록은 그림 3과 같이 하여 그림 4와 같은 성능이 되도록 PI제어기의 이득을 설계하였다.

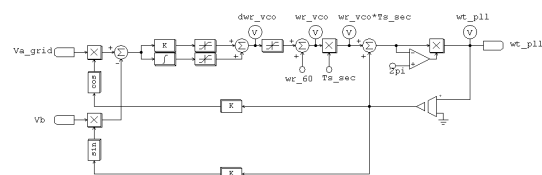
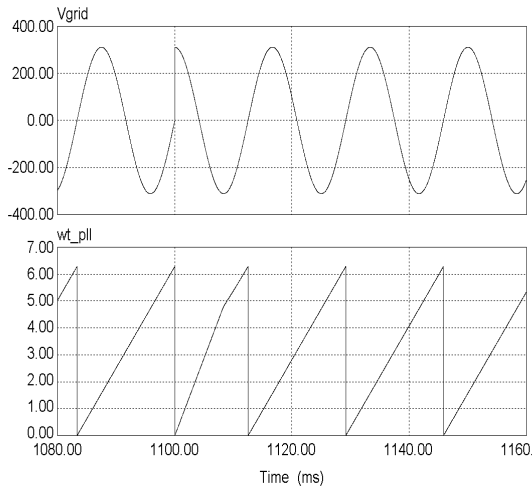


그림 3. DPLL 제어 블록

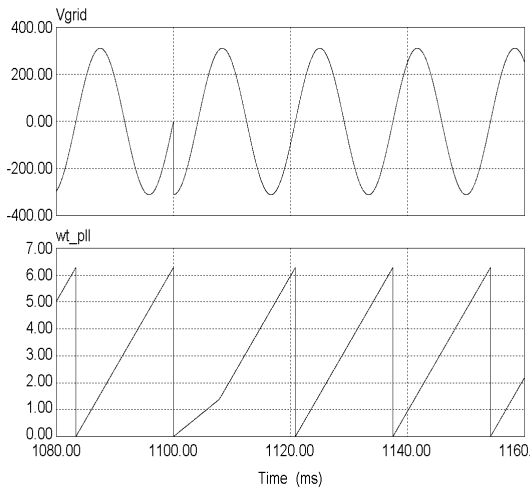
이 위상검출기법의 위상 추종성능은 그림 4와 같이 계통전압에  $\pm 90^\circ$  위상점프가 발생했을 경우와 주파수 스텝변화( $60 \pm 1Hz$ )가 발생했을 경우에 모두 계통전압 한 주기 안에 추종하는 것을 알 수 있다.

이 DPLL에 의해 계산되는 계통전압의 각속도(주파수)는 PI 제어기의 영향에 따라 계

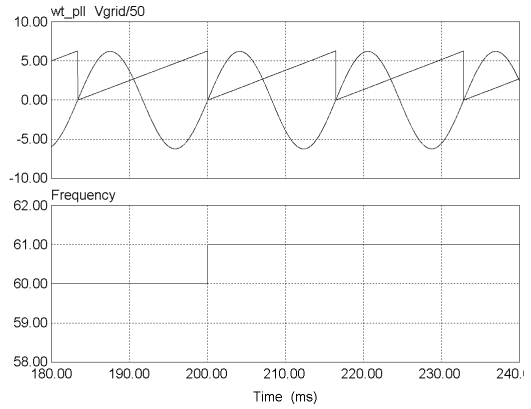
통전압이 영전위를 지나칠 때마다 추종 주파수에 커다란 오차가 발생한다. 이러한 오차에 관련된 노이즈와 계통전압에서 발생하는 노이즈에 의한 영향을 감소시키기 위해 2차 Low-Pass Filter를 사용하였다. Filter의 이득은 1, 차단 주파수는 40Hz, Damping Ratio는 0.7로 하여 스텝 응답속도가 30ms이내가 되도록 설정하였다.



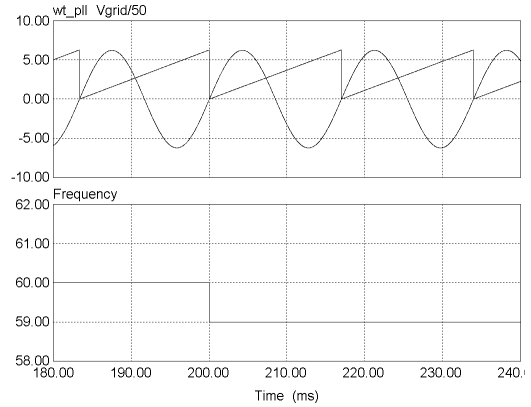
(a) 계통전압의 +90도 위상 점프시 위상 추종 특성



(b) 계통전압의 -90도 위상 점프시 위상 추종 특성



(c) 계통전압의 주파수 스텝변화(+1Hz)에 따른 특성



(d) 계통전압의 주파수 스텝변화(-1Hz)에 따른 특성  
그림 4. DPLL의 위상 추종 특성

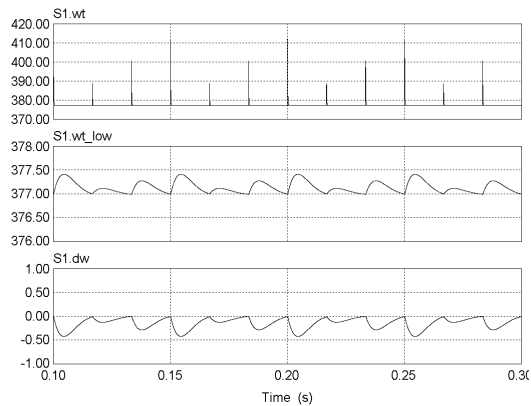


그림 5. DPLL의 각속도, 필터링 후 각속도, 각속도 오차

계통전압의 각속도( $\omega t$ )와 2차 Low-Pass Filter를 통과시킨 각속도( $\omega t_{low}$ ) 및 주파수 오차( $\Delta\omega$ )의 결과는 그림 5와 같고, 이를 이용하여 무효분 전류지령치( $I_{qref}$ )를 계산한 식은 식 (3), (4)와 같다.

$$\Delta\omega = \omega t_{60Hz} - \omega t_{low} \quad (3)$$

$$I_{qref} = G_{AI} \times (\Delta\omega) \quad (4)$$

#### 4. Simulation

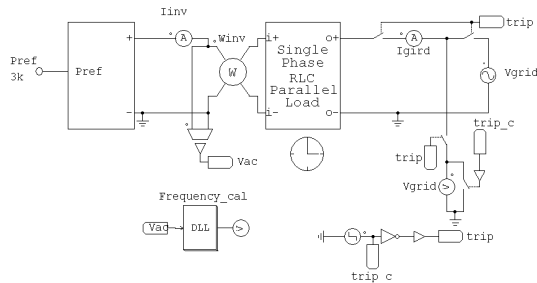


그림 6. 단독운전 시뮬레이션 PSIM 모델

표 1. 시뮬레이션에 사용한 RLC 병렬부하 및 PV PCS의 파라미터

PV PCS	제어주파수	10 [kHz]
	출력전압	220[Vrms], 60[Hz]
IEEE Std 1547의 부하설정	$P_{inv}$	3000 [W]
	$Q$	1
	$P_{qL}$	3000 [VAR]
	$L_{load}$	44.32 [mH]
	$C_{load}$	158.74 [ $\mu$ F]
	$R_{load}$	16.391 [ $\Omega$ ]

PSIM을 이용한 시뮬레이션 수행 시간의 단축을 위해 단상 계통연계형 PV PCS 시뮬레이션 모델은 그림 6과 같이 교류 전류원으로 모델링한 PCS, 단독운전용 RLC 병렬부하, 100kHz 샘플링의 주파수 계산기 그리고 단독운전 발생용 Trip 스위치로 구성하였고, 단독운전발생용 부하는 IEEE Std. 1547에 의하여 Quality Factor를 1인 부하가 되도록

설정하였다. 주요 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

단독운전현상은 그림 7과 같이 단독운전방지법이 없는 조건하에서 0.7초에 정전이 발생하면 계통전압이 상실되었어도 태양광 PV PCS 계통전압의 실효치 및 주파수에 변화가 없는 것으로 인지하여 단독운전을 검출하지 못하게 된다.

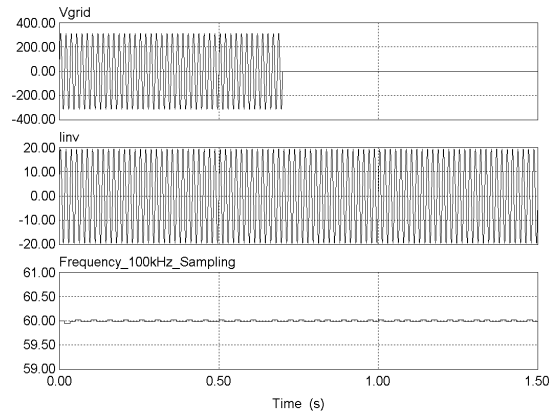


그림 7. 단독운전

단독운전을 검출하기 위한 이득( $G_{AI}$ )을 4.0로 하여 시뮬레이션 한 결과는 아래와 같다.

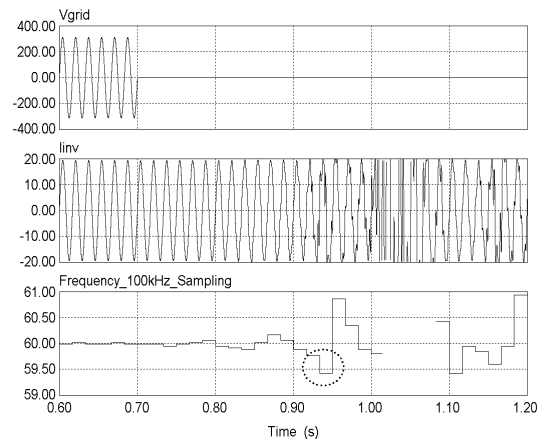


그림 8. 단독운전 검출결과

단독운전을 발생시킨 후 약 0.24초에 주파수가 59.5Hz이하로 변동하는 것을 볼 수 있

다. 시뮬레이션은 입력전력을 이상적인 DC 전압원으로 모의하고, 연계점 전압의 주파수를 변동시키는 이득에 대하여 살펴보기 위해 전력변환동작은 계속 수행되도록 하였다. 그 결과 출력전류의 파형이 점점 왜곡되는 현상이 있어도 전력변환동작을 정지하지 않으나 연계점 전압의 주파수 변동이 약 0.24초에서 약 59.5Hz 이하로 변함을 알 수가 있다. 만약 PV PCS의 UFR값이 59.5Hz라면 이 부분에서 PV PCS가 계통전원의 이상으로 판단하여 전력변환동작을 정지할 수 있는 근거로 사용할 수 있다. 단독운전을 검출하기 위한 이득( $G_{AI}$ )은 약 4.0이상에서 검출 가능하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 단상 계통연계형 PV PCS의 단독운전검출기법 중 무효전력변동기법에 대하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 수행 시간을 줄이기 위해서 스위치의 PWM 제어에 모델이 아닌 정현파 PWM 전압원의 평균화 모델을 이용하였다. 논문에서 사용한 무효전력변동기법의 단독운전검출기법의 성능은 계통이 정상인 상태에서는 출력전력의 품질을 훼손하지 않아야 하며, 단독운전시에는 단독운전을 신속히 검출하기 위해서 정밀한 주파수 계산과 빠른 위상 검출이 필요하다. 그러므로 주파수 계산은 계통전압의 한 주기에 한 번씩 계산되는 영점검출기법 대신 매 제어주기 마다 계산되는 DPLL(digital phase locked loop)를 이용하였다. 또한 DPLL에서 계산되는 주파수에 대한 노이즈 대책으로써 2차 저주파통과필터를 사용하여 그 성능을 확인하였고, 계통전압의 기준 주파수(60Hz)와 저주파통과필터를 이용하여 계산된 주파수와의 오차 값을 무효분 전류변동량의 지령 값을 계산하는 요소로 사용하였다. 그 결과 단독운전기법에서 사용되는 이득( $G_{AI}$ )이 영점검출 방식에 의한 이득보다 매우 작은 값이 되므로 단독운전이 아닌 경우에는 상대

적으로 작은 양의 무효전력만이 변동되어 전력품질을 유지할 수 있으면서 단독운전발생시 이를 신속히 검출할 수 있도록 하였다.

## 후 기

이 논문은 2006학년도 광운대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. 최주엽 외 “태양광발전 시스템의 계통 연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 관한 연구,” 최종 보고서, 2003. 5, 산업자원부, 2001-N-PV03-P-01.
2. Youngseok Jung, Junghun So, Gwonjong Yu, Jaeho Choi, “Modeling and a nalysis of Active islanding detection methods for photovoltaic power conditioning systems,” CCECE 2004-CCGEI 2004, Niagara Falls, May/mai 2004, 0-7803-8253-6/04-\$17.00, IEE.
3. 최중우 외 “Novel Digital PLL Control for Single-Phase Photovoltaic System,” 전력전자학회, ICPE(ISPE)논문집, 2004년, 10, pp.209~213