

개선된 DFT을 이용한 무효전력변동 단독운전 검출기법의 성능 개선

姜德弘*, 崔大根*, 李教範†

Performance Improvement of an Anti-Islanding Algorithm using the Variation of Reactive Power with an Improved DFT Method

Duk-Hong Kang, Dae-Keun Choi, and Kyo-Beum Lee

요 약

본 논문에서는 무효전력변동기법을 사용하여 단독운전을 검출을 하기 위해서 선행되어야 하는 주파수 검출 방법 중에서 개선된 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform; DFT), 즉 Goertzel 알고리즘을 이용한 단독운전 검출기법을 제안한다. 실제 태양광 발전 시스템의 설치를 위해서는 전기사고나 시스템에 악영향을 유발하는 단독운전 검출기법의 연구가 선행되어야 한다. 적용하는 주파수 검출방법은 Goertzel 알고리즘을 이용한 기법으로 기존의 영점검출기법과 가상의 2상 PLL(Phase Locked Loop)에 비하여 외란의 영향에 강인하며 빠른 검출이 가능하다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 주파수검출기법인 영점검출기법과 가상의 2상 PLL을 이용한 주파수 검출과 제안하는 알고리즘을 비교하고 그의 우수성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a new anti-islanding method for single-phase grid-connected photovoltaic (PV) systems using Goertzel algorithm. The proposed scheme is based on inducing increases or decreases of frequencies of load voltage and current that is in the form of existences or periodical variations of the reactive power components. The frequency detection is needed to apply this power variation method to the grid-connected power converter. The proposed method is able to get a fast detection for anti-islanding without the effect of harmonics and noises. The simulation and experiment results validate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Anti-islanding, Photovoltaic system, Reactive power, Improved DFT method, F+requency detection

1. 서 론

최근에 유가 폭등 등 에너지 자원과 환경오염 문제 등에 의해서 태양광 분산 전원의 발전과 연구는 급속

도로 발전하였다. 태양광 발전은 환경적으로나 잠재적인 가능성 면에서 가장 이상적인 시스템으로 주목 받고 있다. 그러나 태양광 발전 시스템 안에서 배전선의 일부 혹은 전부가 계통으로부터 전력을 공급받지 못하고 자체 발전 시스템의 전력 공급만 유지되는 상태인 단독운전이 발생할 수 있는 문제점을 가진다^[1]. 단독운전 상태가 지속되면 선로 유지 중 보수자의 감전과 같은 근거리 접근 사고가 발생할 우려가 높고, 배전선의 전기설비에 악영향을 준다. 또한 단독운전 중에 계통이

†교신저자 : 정회원, 아주대 전자공학부 부교수

E-mail : kyl@ajou.ac.kr

*학생회원, 아주대 전자공학과 석사과정

접수일자 : 2010. 2. 23

1차 심사 : 2010. 3. 23

2차 심사 : 2010. 3. 24

심사완료 : 2010. 3. 26

다시 복구되면, 투입된 계통 전압과 단독운전 된 시스템의 출력 사이에 위상 오차가 발생하여, 태양광 발전 시스템이나 배전계통의 설비가 손상된다^[2]. 이러한 문제로 인하여 계통 연계형 태양광발전 시스템은 계통이 분리되면 이를 빠르게 인지하여 즉시 발전 동작을 멈추어야 한다. 따라서 태양광 발전 시스템에서 단독운전을 검출하기 위한 단독운전 검출기법에 대한 연구가 우선적으로 고려되고 연구되어야 한다^[3].

단독운전 검출기법은 수동적 검출기법과 능동적 검출기법으로 나눌 수 있다. 대부분의 수동적 인지법은 계통 차단 시 발생하는 부하 변동에 의한 전압 및 주파수, 위상 변화를 관찰하여 단독운전을 인지하는 방법으로 위상 점프 인지법, 전압/주파수 인지법, 고조파 인지법 등이 있다^[4]. 계통과의 연계가 유지되고 있는 정상 상태에서도 전력계통의 큰 부하 변동이 발생할 가능성이 있는데, 수동적 인지법은 이 상황을 단독운전 상태로 잘못 판단할 가능성이 있다. 그러므로 전압/주파수 인지법과 같은 수동적 인지법은 계통전압 및 주파수의 정상범위 안에서는 안정적으로 동작하여야 하기 때문에 단독운전 불검출 가능범위를 설정한다. 하지만 수동적 인지법의 경우 단독운전 발생 시 전압 및 주파수의 변화가 미미하거나 없을 경우 그림 1과 같이 불검출 영역(Non-detection Zone; NDZ)이 존재하게 되고 전압/주파수 단독운전 불검출 가능범위 안에 놓이게 되어 단독운전 인지가 불가능하다^[5]. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해, 태양광 발전 시스템의 출력을 임의로 변화시켜 그에 따른 부하전압 및 주파수의 변화를 관찰함으로써 단독운전을 인지하는 능동적 인지법에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 능동적 인지법에는 주파수 바이어스법, 샌디아 주파수 변동법, 주파수 점프법, 샌디아 전압 변동법, 출력전력 변동법 등이 있다^[4]. 능동적 인지법은 시스템 내의 인버터 출력전류에 영향을 주어 단독운전 상태에서 태양광 발전 시스템이 발전량과 부하가 요구하는 전력량이 동일하게 유지되는 평형 상태를 임의로 깨뜨려 단독운전에 적극적으로 대응하는 방법이다. 능동적 인지법인 전력변동기법 중 무효전력변동기법은 계통에 무리가 가지 않는 상태로 임의의 무효전력을 계통에 투입하여 수동적 인지법이나 다른 능동적 인지법으로 검출이 어려웠던 부분을 개선하였다. 그러나 무효전력변동기법을 사용 시 단독운전이 발생하면 주파수의 변화를 인지하여 태양광 발전 시스템으로부터 전력을 차단해야 하므로 정확한 위상추종 및 주파수 검출기법에 따라 성능에 큰 영향을 미친다.

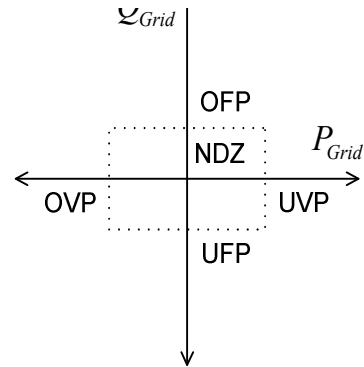


그림 1 단독운전 검출에서의 수동적 인지법의 NDZ
Fig. 1 NDZ of the passive method for anti-islanding

본 논문에서는 무효전력변동기법의 단독운전검출 성능을 향상시키기 위한 방법으로 Goertzel 알고리즘을 적용하고, 기존의 영점검출기법과 가상 2상의 위상동기회로(Phase Lock Loop; PLL)을 이용한 주파수 검출과 비교하여 제안하는 알고리즘의 우수성을 검증한다.

2. 무효전력변동기법을 이용한 단독운전 검출기법

본 논문에서는 무효전력변동기법을 사용하였다. 그림 2와 그림 3은 태양광 발전 시스템와 제어 블록도이다. 본 시스템은 부하에서 필요로 하는 유효전력과 무효전력의 양을 인버터와 계통으로부터 얻는다. 따라서 단독운전 발생 시 연계점(VCC)에서 발생하는 전압과 주파수의 변화를 이용하여 단독운전을 검출한다. 그림 3과 같이 컨버터는 통류율 (Duty ratio)를 제어하여 DC-link 전압을 400[V]으로 유지하고 전류제어기를 통해 PWM 신호를 만들고 인버터를 제어한다.

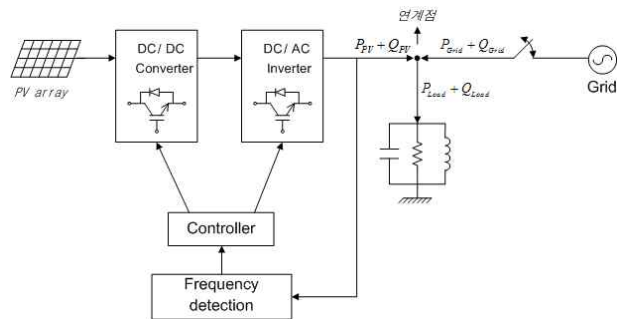


그림 2 태양광 발전 시스템 블록도
Fig. 2 Block diagram of photovoltaic system

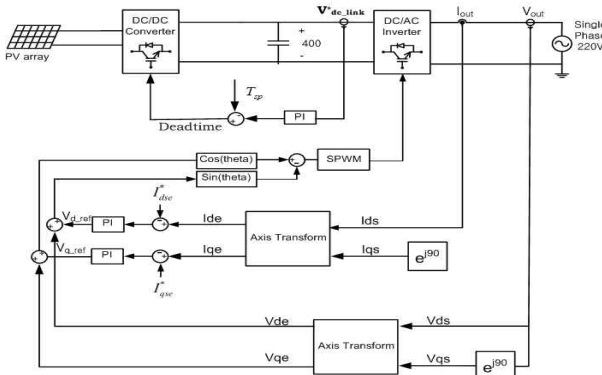


그림 3 제어 블록도
Fig. 3 Control diagram

태양광 발전 시스템은 기존의 방식과 같게 최대전력점 추적(Maximum Power Point Tracking; MPPT)을 이용하여 최적의 유효전력을 유지하는 방법을 사용한다. 본 시뮬레이션 및 실험에서는 태양전지를 대신하여 일정한 전압원을 사용하였다. 또한 인버터의 전류를 제어하여 유효전력을 제어한다. 그리고 무효전력량은 그림 4과 같이 주기적으로 변화를 주어 단독운전 발생 시 주파수의 변화를 발생시킨다.

- 1) $Q_{PV} > 0, (|Q_{PV}| = 2.5\%) - T_P$
- 2) $Q_{PV} < 0, (|Q_{PV}| = 2.5\%) - T_N$
- 3) Q_{PV} 의 과도 상태 시간 - T_R

식 (1), (2)은 연계점의 전력식을 보여준다^[6].

$$P_{Load} = P_{PV} + P_{Grid} = \frac{V_{Load}^2}{R} \quad (1)$$

$$Q_{Load} = Q_{PV} + Q_{Grid} = V_{Load}^2 \times ((\omega L)^{-1} - \omega C) \quad (2)$$

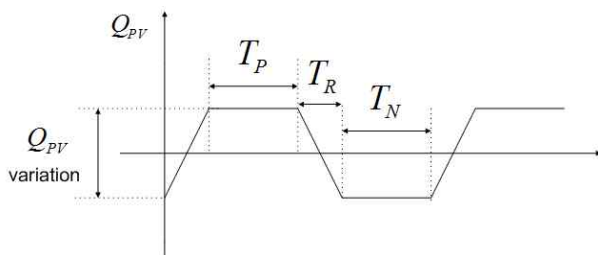


그림 4 무효전력 변동
Fig. 4 The change of reactive power

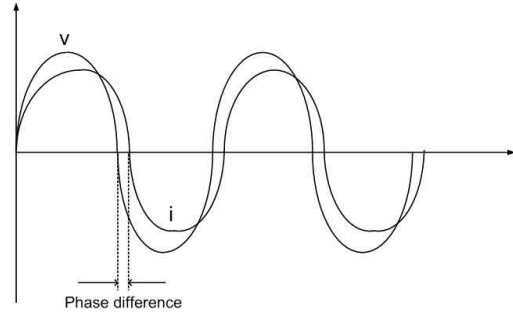


그림 5 $Q_{PV} > 0$ 일 때의 전압과 전류파형
Fig. 5 Period of output voltage and current: $Q_{PV} > 0$

식 (1)에서 보는 것과 같이 $P_{Load} = P_{PV}$ 일 경우 전압에 변화가 생기지 않는다. 따라서 OVP/UVF (Over/Under Voltage Protection) 회로로 검출이 불가능하다. 또한 식 (2)에서 $Q_{Load} = Q_{PV}$ 일 경우 주파수에 변화가 생기지 않아 OFP/UF (Over/Under Frequency Protection) 회로로 검출이 불가능하다. 하지만 무효전력변동기법을 사용하면 주기적인 무효전력의 변화를 주어 시스템의 출력전압과 출력전류 사이의 위상 차이를 만들어 단독운전 시 주파수에 변화를 일으킨다. 무효전력량이 양수일 때의 파형은 그림 5와 같다.

위상 차이는 단독 운전 발생 시 부하 전압과 전류의 주파수를 감소시키거나 증가시키게 되고 OFP/UF 회로가 작동하여 단독운전을 검출하게 된다. 본 논문에서 제안된 정상상태 연계점 전압의 기본 주파수와 저주파/고조파 보호회로의 허용 범위는 규격 IEEE 929를 참고하여 기본주파수(f_o)는 60[Hz], 최저 허용 주파수(f_{Min})는 59.3[Hz]이고 최대 허용주파수(f_{Max})는 60.5[Hz]로 정하였다. 계통에 투입되는 무효전력량은 역률의 감소에 의해 계통에 악영향을 준다. 그래서 제안된 방법은 계통의 역률을 고려하여 무효전력을 6%이하로 제한한다. 역률은 식 (3)과 같다.

$$Power\ factor = \cos\{\tan^{-1}(6/100)\} = 0.9982 \quad (3)$$

무효전력변동기법은 정상상태 시 계통에 역률이 거의 1에 가까워 계통에 영향이 거의 없기 때문에 안전한 방법이다. 무효전력변동기법은 무효전력 변동범위를 조정함으로써 단독운전검출이 가능하다. 심지어 역률에 영향을 거의 주지 않으면서 주파수의 변화를 발생시키므로 $P_{Load} = P_{PV}$ 와 $Q_{Load} = Q_{PV}$ 인 경우에도 검출할 수 있다. 무효전력 변동기법에서 NDZ는 국제기준 IEEE Standard 1547(과거 IEEE Standard 929-2000)에 의해

무효전력 변화량과 Q_f 에 관련이 있다. Q_f 가 커짐에 따라서 NDZ가 넓어 지므로 본 논문에서는 Q_f 는 1로 하였다. 무효전력변동기법을 사용하여 단독운전 발생 시 주파수의 변화를 검출하여 단독운전 검출을 하기 위해서는 고조파가 있는 가운데에 안정적이고 빠른 주파수 검출을 필요로 한다.

3. 위상 및 주파수 검출 기법

3.1 영점 검출 기법을 이용한 기법

기존에는 무효전력변동기법을 사용하여 단독운전을 검출 할 시 주파수 계산을 영점검출기법(Zero-crossing) 기법을 사용하였다^[7]. 영점검출기법의 블록도는 그림 6 과 같다. 입력 전압이 영점을 지나는 점을 계산하여 주파수를 얻고 주파수를 적분하여 위상각을 구한다.

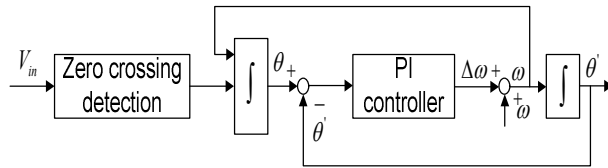


그림 6 영점 검출기법을 이용한 주파수 검출
Fig. 6 Block diagram - zero-crossing method

이 방식으로 계통전압의 주파수를 계산하게 되면, 샘플링 주파수가 높을수록 주파수 분해능이 정밀해 질 수 있으나 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 주파수 값이 계산됨으로 1~3의 카운터 오차 값을 이용하여 단독운전을 검출하기 위해서는 무효전력변동의 이득이 매우 커야 한다. 이는 단독운전이 아닌 상태에서 불필요하게 출력전력의 품질을 훼손할 가능성이 있다. 그리고 노이즈에 민감하여 계통전압에 노이즈 투입 시 위상 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차와 노이즈에 대한 영향을 감소시키기 위해 히스테리시스를 적용해야 하므로 정확한 주파수를 추정하기에 문제가 있다. 따라서 단독운전을 효과적으로 검출하기 위해서는 매 샘플링 시간마다 계통전압의 위상과 주파수를 계산 할 수 있는 새로운 알고리즘이 필요하다.

3.2 가상의 2상 PLL을 이용한 검출 기법

기존의 가상의 2상 PLL의 구조는 그림 7과 같다^[7].

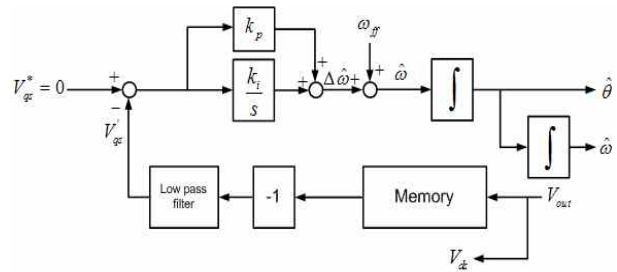


그림 7 PLL을 이용한 주파수 검출
Fig. 7 Block diagram - PLL

그림 7에서 입력 전압은 아래 식 (4)와 같다.

$$V_{out} = V_{max} \sin(\omega t) = \sin(\theta) \quad (4)$$

동기 좌표계의 V_{ds} 와 V_{qs} 은 아래와 같다.

$$V_{ds} = V_{max} \sin(\theta) = V_{out} \quad (5)$$

$$V_{qs} = V_{max} \cos(\theta) \quad (6)$$

입력 전압 V_{out} 은 한 주기로 메모리에 저장된다. V_{ds} 은 V_{out} 와 같게 되고 V_{qs} 은 1/4주기 뒤에 값에 -1 을 곱한 값이 된다.

$$V_{qs} = -V_{out} \left(t - \frac{\pi}{2\omega} \right) = -V_{max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \approx V_{max} \sin(\theta) \quad (7)$$

이 경우 PI제어기와 저역통과필터가 있어 최적 이득 설정을 해야 하며, 대역폭이 존재하여 모든 신호의 영역에 대해서 추종하지 못한다. 그리고 계통의 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하의 영향으로 인하여 계통전압에 3차, 5차 등의 고조파와 같은 저차고조파가 포함되어 왜곡된 위상각이 발생한다. 이러한 왜곡된 위상은 동기좌표계의 d-q축 전류에 리플성분으로 나타난다. 이는 출력 교류 전류 상에 포함되어 전 고조파 왜율 (Total Harmonics Distortion; THD)에 영향을 준다. 특히 3차 고조파와 같은 기본 주파수에 근접한 왜곡성분의 주파수대역은 계통전압으로부터 기본파 성분을 추출하기 위한 저역통과필터의 차단주파수와 근접하므로 저역통과필터의 설계가 어렵다. 따라서 이러한 가상 2상의 PLL의 단점을 개선한 위상 및 주파수 계산방법이 있어야 단독운전 검출이 개선될 수 있다.

3.3 Goertzel Algorithm을 이용한 검출 기법

Goertzel 알고리즘은 일반적으로 이산푸리에변환 (Discrete Fourier Transform; DFT) 스펙트럼의 계산에 사용되어 왔다^[8-9]. 또한 N-point 적어도 $M \log_2 N$ 의 연산이 요구되는 빠른 푸리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT) 보다 더 효율적이다. 기본적인 Goertzel 알고리즘은 일반적인 DFT나 FFT와 마찬가지로 실수 및 허수의 주파수 구성요소들을 제공하고 실수, 허수 쌍으로부터 크기와 위상을 계산 할 수 있다. Goertzel 알고리즘은 이차 또는 무한의 임펄스 응답 필터이다. 이 필터는 $X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[n] W_N^{nk}$, ($W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$) 로 정의 되어 단상 DFT 결과를 계산한다. Goertzel 필터의 전달함수를 구하면 식 (8)과 같다^[10].

$$H_G(z) = \frac{1 - e^{-j\frac{2\pi k}{N}} z^{-1}}{1 - 2\cos(\frac{2\pi k}{N})z^{-1} + z^{-2}} \quad (8)$$

Goertzel 알고리즘은 z -영역에서 $z = e^{-j\frac{2\pi k}{N}}$ 에 위치에서 영점과 극점이 상쇄되고 $z = e^{j\frac{2\pi k}{N}}$ 에서 순환주파수 $f(= \frac{kf_{sampling}}{N} [Hz])$ 는 $\frac{2\pi k}{N} [Hz]$ 의 표준주파수와 일치할 때 공명이 집중되게 된다. 위에 나온 Goertzel 필터의 전달함수를 시간영역에서의 방정식으로 바꾸면 식 (9), (10)과 같다.

$$v(n) = 2\cos(\frac{2\pi k}{N})v(n-1) - v(n-2) + x(n) \quad (9)$$

$$y(n) = v(n) - e^{-j2\pi k/N}v(n-1) \quad (10)$$

위에 시간영역에서의 방정식을 블록도로 나타내면 그림 8과 같다.

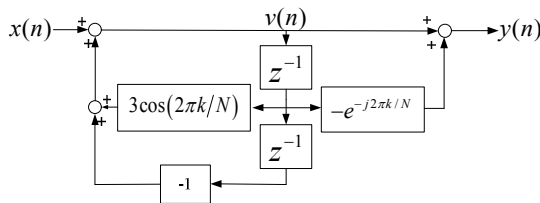


그림 8 Goertzel 알고리즘 블록도
Fig. 8 Goertzel algorithm block diagram

Goertzel 알고리즘의 경우 기존의 DFT와 FFT에 비하여 계산하는 양이 적어 정상분 주파수만 추출할 수 있는 DSP에 유리하다. 또한 노이즈, 리플, 고조파 성분의 영향을 받지않는 장점이 있다. Goertzel 알고리즘의 또 하나의 장점은 2상 PLL에 비해 PI 제어기와 저역통과 필터가 없어 개인 튜닝이 필요 없고, 위상추종범위에 제한을 받지 않는다. Goertzel 알고리즘을 이용한 위상각 추정 블록도는 그림 9와 같다. Goertzel 알고리즘을 통하여 정확한 위상과 주파수를 얻을 수 있다.

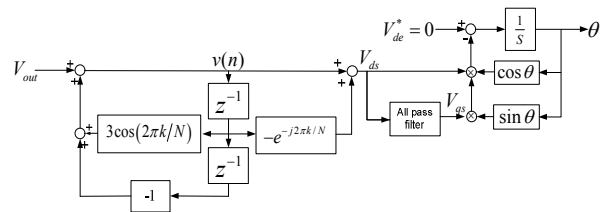


그림 9 Goertzel 알고리즘을 이용한 위상 추정 블록도
Fig. 9 Phase presumptive block diagram using Goertzel algorithm

4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 PSIM을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 PSIM제어 schematic도 이다. 시뮬레이션 상에서는 전압원으로 24[V] 전압을 사용하였고 컨버터 부분에 MOSFET를 사용하여 스위칭된다. 변압기는 1대 18 변압기로 정류를 걸쳐 400[V] DC 전압을 생성한다. 인버터는 IGBT 스위치로 SPWM 신호에 의해서 스위칭한다. 시뮬레이션 상에서의 부하 및 Quality factor의 값은 아래 식 (11)~(14)로부터 계산한다.

$$Resistance, R = V^2/R \quad (11)$$

$$Inductance, L = \frac{V^2}{2\pi f Q_f P} \quad (12)$$

$$Capacitance, C = \frac{Q_f P}{2\pi f V^2} \quad (13)$$

$$Quality Factor, Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (14)$$

시뮬레이션은 유효전력이 1000W, 무효전력이 60Var 인 조건하에서 수행하였으며, 전압은 220V, 60Hz이며, 부하 R, L, C 값은 표 1과 같다.

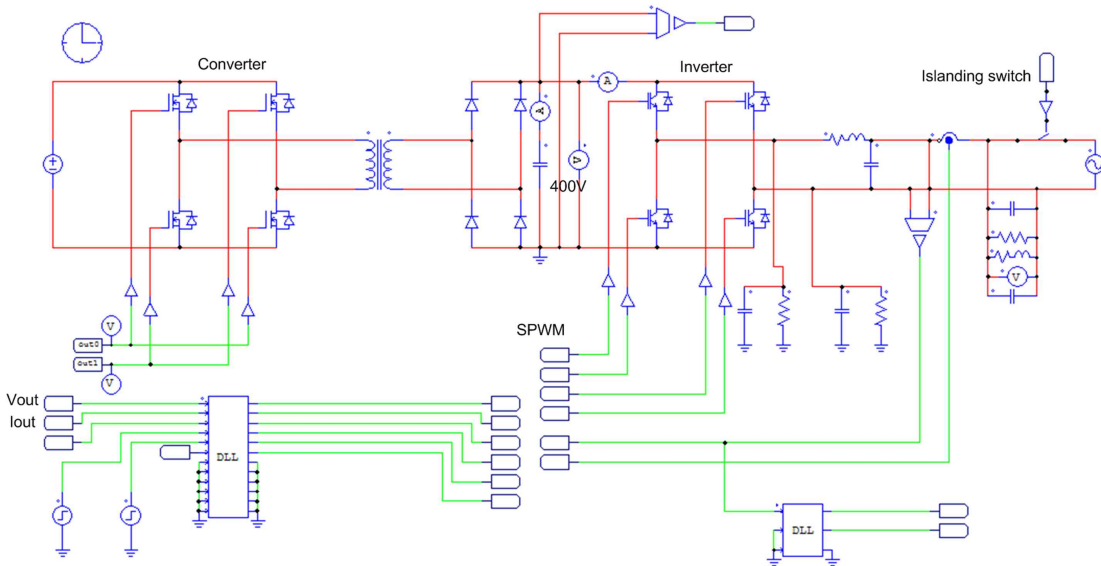


그림 10 시뮬레이션 회로도
Fig. 10 Simulation circuit

표 1 시뮬레이션 조건

Table 1 Rated condition of simulation

유효 전력	1KW
정격 전압	220V
무효 전력	60VAR
R_{Load}	48[Ω]
L_{Load}	128[mH]
C_{Load}	54[μF]
Q_f	1
스위칭 주파수	5[KHz]

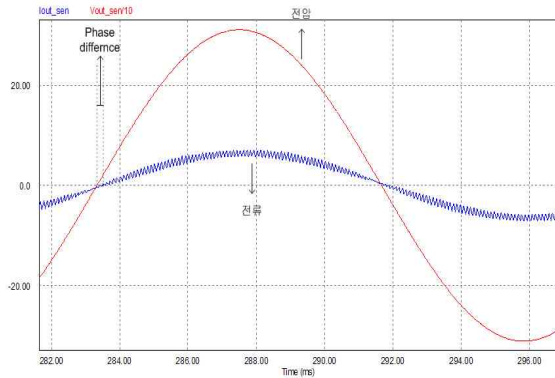


그림 12 전압과 전류의 위상차를 보여주는 파형
Fig. 12 Phase difference of PV inverter with $Q_{PV} > 0$

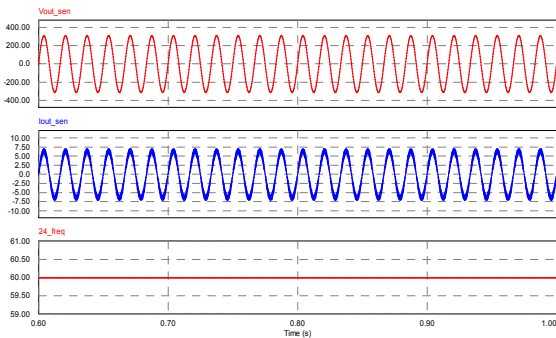


그림 11 단독운전 시 무효전력을 사용하지 않을 때: 전압 (상), 전 류(중), 그리고 주파수(하) 파형
Fig. 11 Simulated waveform with no Variation of Reactive Power - voltage (upper), current (middle) and frequency (lower)

그림 11은 무효전력변동기법의 성능을 나타내는 시뮬레이션 파형이다. 0.711초에 단독운전이 시작되었으나, 무효전력변동기법을 적용하지 않아 검출되지 않는다.

그림 12는 무효전력에 영향에 따른 전압과 전류의 위상차를 나타낸다. 본 논문에서 사용한 무효전력변동기법에서 무효전력 성분이 양일 때는 전압이 전류보다 앞서는 진상이 생긴다.

그림 13~15는 무효전력 투입 시 전압과 전류에 위상차에 의해서 주파수 변화가 발생하고 그 주파수 변화를 감지하여 단독운전임을 확인하여 전력을 차단한 파형이다.

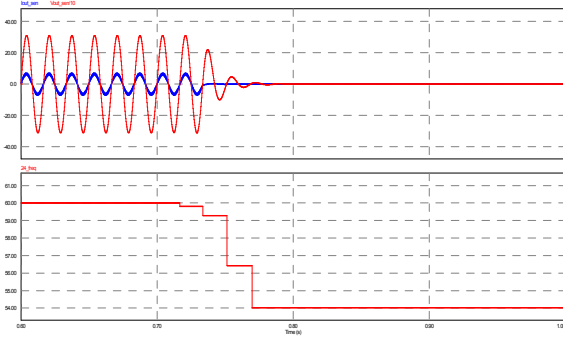


그림 13 영점검출기법을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류, 주파수 결과 파형
 Fig. 13 zero-crossing detection method in RPV method (Voltage, current, and frequency)

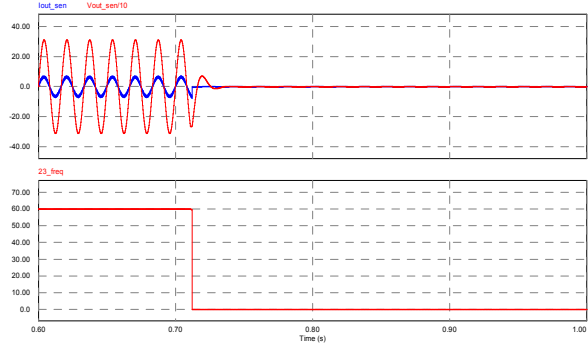


그림 15 Goertzel 알고리즘을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류, 주파수 결과 파형
 Fig. 15 Goertzel algorithm in RPV method

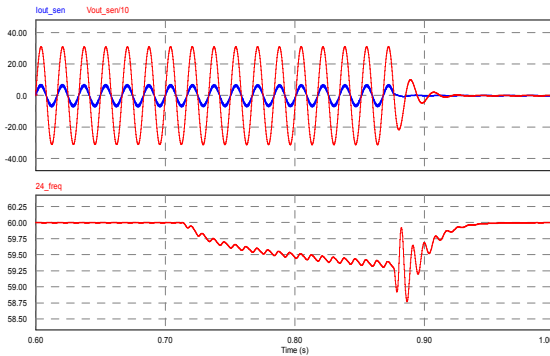


그림 14 가상의 2상 PLL을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류, 주파수 결과 파형
 Fig. 14 PLL in RPV method (Voltage, current, and frequency)

그림 13은 영점검출기법의 성능을 나타낸다. 단독운전이 0.711초에 일어났지만 주기 안에 주파수 변화를 인지하지 못하고 다음 주기에 인지하여 단독운전을 검출한다.

그림 14에서는 가상의 2상 PLL을 사용한 단독운전 검출의 성능을 나타낸다. 가상의 2상 PLL의 경우, 가상의 상을 만드는 과정에서 오차가 발생할 수 있고 정밀한 제어가 어렵다. 따라서 정밀한 제어를 위해 강한 제어기와 필터를 사용한다. 그에 따라 주파수의 민감도가 떨어져 정확한 주파수를 얻기 어렵고 변하는 주파수를 따라가는데 시간이 필요함에 따라 단독운전 검출 시간이 오래 걸린다.

그림 15에서는 제안하는 Goertzel 알고리즘을 이용한 주파수 검출 기법의 성능을 나타낸다. 매 샘플링마다 주파수 계산을 하므로 단독운전검출이 1주기 이내에

가능해 더욱 빠르다. 또한 가상의 2상 PLL을 사용하여 단독운전을 검출하는 것과는 달리 정확한 주파수를 얻을 수 있어 단독운전 오검출의 위험을 줄일 수 있다.

5. 실험

그림 16은 제안한 알고리즘의 성능평가를 위한 실험에 사용된 장비를 나타낸다. 용량은 1kW급으로 전압원은 태양광 모듈을 대신하여 24V DC 전원을 사용하였다. 제안한 알고리즘의 구현을 위한 TMS28335-DSP 제어보드를 사용하였다. 계통연계를 위해 5 [μF]의 커패시터와 6 [mH]의 인덕터를 사용하여 LC-필터를 구성하였다. 임피던스와 리액턴스를 조절하여 $P_{PV}=P_{Load}$, $Q_{PV}=Q_{Load}$ 에 맞는 부하를 선정하였다. 앞단의 컨버터는 20 [kHz]의 스위칭 주파수로 동작하며, 변압기를 거친 뒷단의 컨버터는 5 [kHz]의 스위칭 주파수로 운전한다.

영점 검출 기법을 사용하여 단독운전을 검출하였을 때는 그림 17과 같이 매 주기 마다의 주파수의 변화에 따라 단독운전검출이 되므로 3주기 만에 단독운전검출이 가능하였다. 그림 18은 PLL를 통한 주파수 검출 기법을 적용하였을 때의 단독운전검출 성능을 나타낸다. 정확한 주파수 검출을 위해서 사용된 제어기의 영향으로 주파수 변화의 민감성이 떨어져 영점 검출 기법에 비해 검출의 속응성이 좋지 않다.

제안된 알고리즘을 통하여 단독운전을 검출하였을 때 안정된 주파수와 매 순간의 sampling 한 주파수 값에 따라 그림 19과 같이 단독운전 검출 시간이 빠름을 확인하였다. 실험을 통하여 시뮬레이션과 같은 결과를 얻었다.

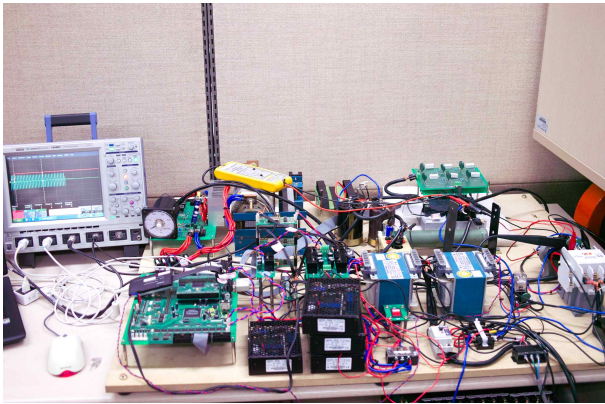
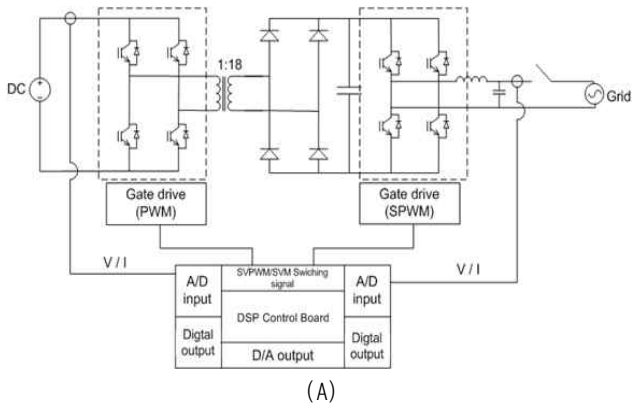


그림 16 1kW 실험 장비의 구조
Fig. 16 Structure of 1kW experiment

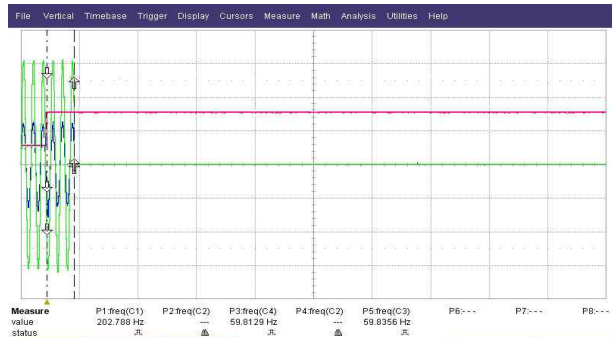


그림 17 영점검출기법을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류 실험 파형

Fig. 17 zero-crossing detection method in RPV method (Voltage, current)

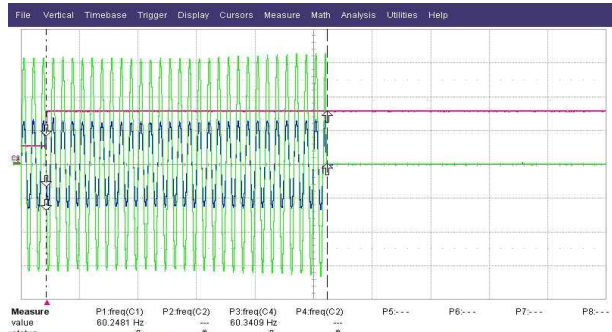


그림 18 가상의 2상 PLL을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류 실험 파형

Fig. 18 PLL in RPV method (Voltage, current)

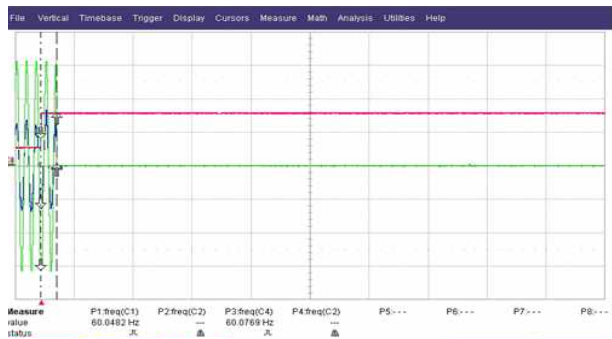


그림 19 Goertzel 알고리즘을 사용한 단독운전 검출 시 전압과 전류, 주파수 결과 파형

Fig. 19 Goertzel algorithm in RPV method (Voltage, current)

아래의 표 2는 실험 결과에서 나온 단독운전 검출 시간을 보여 준다. 아래 표와 같이 제안된 알고리즘을 사용하였을 경우 단독운전 발생 시 가장 빨리 검출 되었다.

표 2 주파수 검출에 따른 검출 시간 비교
Table 2 Detection time of the algorithms suggested

주파수 검출 기법	검출 시간
영점 검출 기법	47.26 [ms]
PLL	479.28 [ms]
Goertzel algorithm	26.34 [ms]

6. 결 론

본 논문에서는 단상 계통연계형 인버터에서 Goertzel 알고리즘을 적용한 무효전력변동 단독운전검출기법의 성능 향상 방법을 제안하였다. Goertzel 알고리즘은 한 주기 마다 검출되는 영점검출기법보다 빠른 계산과 위상 검출이 가능하여 신속한 단독운전검출을 할 수 있으며, 가장 2상 PLL보다 안정적인 위상각 추정으로 인해 오작동의 위험이 없으며 빠른 단독운전검출을 할 수 있다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20090069643).

참 고 문 헌

[1] S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, and P.A. Crossley, "Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generator: A comprehensive survey", *Electric Power Systems Research* 79, pp. 984-992, 2009.

[2] B. Yu, M. Matsui, J. So, and G. Yu, "A high power quality anti-islanding method using effective power variation", *Solar Energy*, Vol. 82, No. 4, pp. 268-378, April, 2008.

[3] F. D. Mango, M. Liserre, and A. Dell'aquila, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV System. Part 2: Active Methods", *Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1884-1889, Aug, 2006.

[4] P. Mahat, Z. Chen, and B. J. Birgitte, "Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation", *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2743-2748, 2008, April.

[5] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept", *IEEE Trans. on Power*

Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1171-1176, 2004.

[6] M. E. Ropp, "Analysis and Performance Assessment Of the Active Frequency Drift Method Of Islanding prevention", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 811-816, 1999.

[7] J. W. Choi, Y. K. Kim, and H. G. Kim, "Digital PLL control for single-phase photovoltaic system", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 153, No. 1, pp. 40-46, 2006. Jan.

[8] E. Jacobsen, R. Lyons, "The sliding DFT", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 20, No. 2, pp. 74-80, 2003, March.

[9] K. P. Sozanski, "Sliding DFT Control Algorithm for Three-Phase Active Power Filter", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006*, pp. 1223-1229, 2006, March.

[10] 김재형, 지용혁, 원충연, 정용채, "개선된 DFT를 이용한 위상 추종방법", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 91-93, 2008. 6.

저 자 소 개



강덕홍(姜德弘)

1984년 1월 15일생. 2009년 아주대 정보통신대 전자공학부 졸업. 현재 아주대 전자공학과 석사과정.



최대근(崔大根)

1980년 12월 28일생. 2009년 아주대 정보통신대 전자공학부 졸업. 현재 아주대 전자공학과 석사과정.



이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.