

계통연계형 태양광 인버터의 단독운전 방지를 위한 새로운 알고리즘 개발

(Development of Novel Algorithm for Anti-Islanding of Grid-Connected PV Inverter)

최정식* · 고재섭 · 정동화**

(Jung-Sik Choi · Jae-Sub Ko · Dong-Hwa Chung)

Abstract

This paper proposes novel algorithm for anti-islanding of grid-connected photovoltaic(PV) inverter. The islanding of PV systems can cause a variety of problems such as deterioration in power quality and electric shock. To prevent islanding, many anti-islanding methods are researched. Typical methods of anti-islanding are active frequency drift(AFD) and active frequency drift positive feedback(AFDPF). However, the AFD has problem that widely exists non diction zone(NDZ). The AFDPF is a method that improves the AFD method and is detected islanding by changing the chopping fraction(cf). However, The AFDPF does not detect when cf is very small and does not satisfy the IEEE Std. 929-2000 when cf is very big. Therefore, this paper proposes novel anti-islanding method that is simple to implement using virtual resister. The anti-islanding method proposed in this paper is compared with conventional method. The validity of this paper is proved using this result.

Key Words : PV System, Islanding, Anti-Islanding, Virtual-Resister

1. 서 론

태양광발전은 태양의 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 시스템이다. 태양광발전은 무한하고 청정한 태양을 에너지원으로 사용하므로 연료가 필요 없고, 설비자체가 가동부분이나 열기관이 없어 수명이

길다. 따라서 이러한 태양광 발전시스템이 각광받고 있다[1-2]. 이러한 태양광발전 시스템은 계통과 연계 여부에 따라 독립형과 계통연계형으로 분류된다. 계통연계형은 전력 계통과 연계되어 운전되기 때문에 수용가 및 계통에 피해를 주지 않도록 전압변동 범위, 고조파 억제, 역률개선 직류성분 제거, 과도현상 보호, 단독운전 방지 등과 같은 기술이 필요하다.

계통연계형의 단독운전은 상용 계통의 전력품질 뿐만 아니라 감전사고 등과 같은 문제 때문에 이를 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다[3]. 이러한 단독운전 검출기법은 크게 로컬제어와 원격제어가 있다. 로컬

* 주저자 : 전자부품연구원
** 교신저자 : 순천대학교 전기 제어공학과
Tel : 061-750-3543, Fax : 061-752-1103
E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr
접수일자 : 2011년 7월 19일
1차심사 : 2011년 7월 23일
심사완료 : 2011년 8월 30일

제어는 수동법과 능동법이 있으며, 수동법은 인버터의 파라미터가 설정값 이상일 경우 차단되는 기법이다. 대표적인 기법으로 특정 주파수의 연계점에서 출력전류의 주입에 기반하는 AFD(Active Frequency Drift) 기법이 제안되었다[4]. 이 기법은 구현이 용이하고 다수의 인버터에 적용이 가능하지만 분산전원용 인버터의 전력품질을 저하시킬 수 있고, 초핑 요소 값에 의존하는 NDZ(Non Detection Zone)가 폭 넓게 존재하는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 NDZ에서 매우 큰 값소폭을 갖는 cf(Chopping Fraction)를 변화시킴으로써 우수한 성능을 나타낼 수 있는 AFDPF(Active Frequency Drift Positive Feedback) 기법들이 연구되었다[5-6]. 그러나 AFDPF 기법은 cf가 출력전류의 THD(Total Harmonic Distortion)와 비례적인 관계이기 때문에 정상일 경우에 출력전류의 THD 악화에 영향을 줄 수 있다. 또한 cf값의 변화에 따라 단독운전을 검출을 못하거나 IEEE Std. 929-2000의 규격을 벗어나는 문제점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 가상 레지스터를 이용하여 구현이 간단한 새로운 단독운전 방지기법을 제시한다. 제시된 단독운전 방지기법은 종래의 기법과 성능 비교를 통해 본 논문의 타당성을 입증한다.

2. 태양전지 모델링

빛이 조사될 때 광기전력 효과를 이용한 태양전지의 등가회로를 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[7-8].

여기서 I_{ph} 는 광전류, I_d 는 다이오드 포화전류이다.

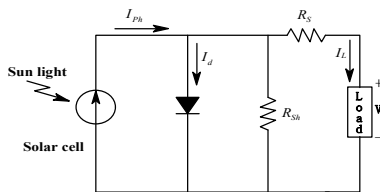


그림 1. 태양전지의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of solar cell

태양전지의 등가회로부터 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_{ph} 와 일치하고, 다이오드 포화전류 I_d 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_d} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서 V_{oc} 는 개방전압, k 는 볼츠만 상수, q 는 전하 [C], T 는 태양전지 동작온도[K]를 나타낸다. 또한, 온도변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{ph} = I_{sc} S_N + I_t (T_c - T_r) \quad (3)$$

$$I_d = I_o \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 \cdot \exp \left(\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (5)$$

$$I_L = I_{ph} - I_d - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

여기서 S_N : 단위 일사량, B : 제조상수

I_t : 표면온도 1. C 상승 시 단락 전류 온도계수 [A/K]

T_c : 태양전지 온도[K], T_r : 태양전지 동작 기준온도[K]

I_{or} : 태양전지 동작 기준온도에서 역포화전류[A]

E_g : 에너지 밴드 갭 (Si PN 접합 에너지 Gap, 1.12[eV])

식 (3)~(6)을 이용하면 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며, 그림 2는 태양전지 어레이의 PSIM 모델과 DLL(Dynamic Link Library)을 이용하여 일사량과 온도의 영향을 고려한 회로도를 나타낸다.

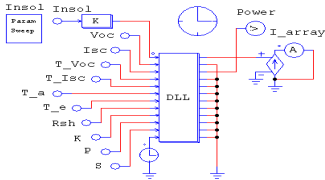


그림 2. 태양전지 어레이의 PSIM 모델
Fig. 2. PSIM model of solar cell array

3. 영점 검출 계통연계 알고리즘

영점 검출기법은 계통전압의 영점을 검출하여 위상을 초기화하는 기법이다. 즉 한 주기나 반주기마다 영점을 지나는 점에서 위상차를 검출하여 위상제어를 하고 추정 주파수로 위상(θ)을 계산한다. 그림 3은 영점 검출기법에 대한 제어 블록도를 나타낸다.

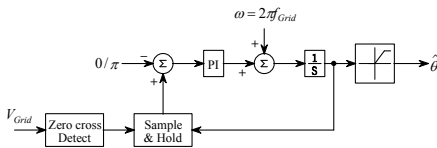


그림 3. 영점 검출기법의 제어 블록도
Fig. 3. Control block diagram of zero-cross detection method

그림 4는 영점 검출기법의 제어 알고리즘을 나타낸다. 계통전압을 샘플링하여 현재 값과 이전 값을 곱셈 연산하여 영점을 검출한다. 이 때 현재 값이 0보다 크면 위상이 0인 경우이고 현재 값이 0보다 작으면 위상이 π 인 경우이다. 영점 검출기법은 노이즈에 민감하다는 단점이 있으나 필터를 통해 제거가 가능하고 제어기의 구조가 간단하여 쉽게 구현할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 구조가 간단하고 구현이 용이한 영점 검출기법을 이용하여 단상 PLL(Phase Locked Loop) 제어를 수행하였다.

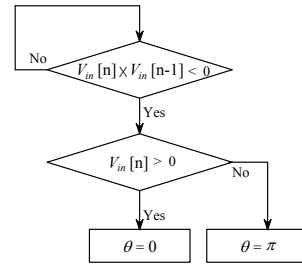


그림 4. 영점 검출기법의 제어 알고리즘
Fig. 4. Control algorithm of zero-cross detection method

4. 단독운전 방지기법

계통연계형 시스템에서의 단독운전 현상이란 전원 측의 이상으로 계통전압이 상실된 후에도 송전시스템 및 다른 배전 계통과 분리된 상태에서 병렬 연결된 부하에 전력공급을 지속하고 있는 현상을 말한다. 그림 5와 같은 일반적인 계통연계형 PV 시스템에서 인버터는 변압기와 차단기를 통해 계통과 연결되며 부하는 인버터와 계통 사이의 연계점에 연결된다. 태양전지 어레이와 인버터를 포함하는 PV 시스템의 출력은 일반적으로 전류원처럼 동작하며 상용계통과 병렬 연계 부하에 단자 전압과 동위상 및 동일 주파수의 순수 정현파 전류를 공급한다.

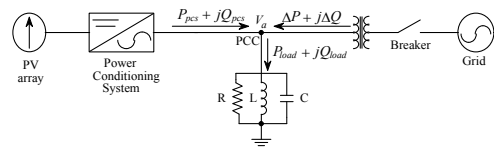


그림 5. 태양광발전 시스템과 전력계통 흐름
Fig. 5. Power flow between PV generation and grid

만약 계통 측의 스위치가 차단된다면 병렬로 연결된 부하전력과 인버터의 발전전력이 일치하는 특정조건에서는 전압의 크기와 주파수의 변동폭이 매우 작다. 따라서 인버터는 계통의 차단을 인식하지 못하게 된다. 그리고 상용계통과는 단절된 상태에서 배전 계통과 병렬부하에 지속적인 전류를 공급하게 된다. 이러한 현상을 단독운전 현상이라고 한다. 이러한 단독운전 현상이 발생할 경우 제기되고 있는 문제점은 다음

과 같다[9-10].

1) 부하에 대한 안전성

계통연계형 인버터의 경우 계통전압을 검출하여 출력제어가 이루어진다. 그러나 단독운전 현상이 발생할 경우 인버터의 출력전압과 주파수는 연결된 부하와의 관계에 의해서 결정된다. 따라서 불규칙적인 전압변동을 초래하고 민감한 부하에 영향을 주게 되어 손상을 주거나 파괴될 수도 있다.

2) 계통의 보호협조에 대한 안전성

단독운전이 발생된 후의 전압은 인버터의 출력전류와 연계된 부하의 관계에 의하여 형성된다. 따라서 인버터 출력전압의 위상은 실제 계통전압의 위상과 일치하지 않게 되어 과전류가 발생되거나 계통전원의 재 트립 및 연계된 부하의 손상을 유발할 수 있다.

3) 사람에 대한 안전성

단독운전 현상이 발생되어 인버터가 전력을 공급하고 있다면 작업자는 직접적으로 감전되거나 또는 선로작업 중이라면 전기쇼크로 인하여 추락할 수 있는 위험이 존재한다. 그러므로 정전 등으로 인해 주 전원으로부터 전력의 공급이 중단된 경우에는 PV 시스템은 이를 검출하고 즉시 운전을 정지하여 배전 계통과 분리되어야 할 필요가 있다.

4.1 종래의 단독운전 방지기법

4.1.1 주파수 쉬프트 기법

종래의 대표적인 단독운전 방지기법으로는 주파수 쉬프트 기법은 일반적으로 AFD 기법과 이를 보완한 AFDPF 기법이 있다[11-13].

AFD 기법은 그림 6에 보이는 것처럼 출력전류의 영교차점에 일정 크기의 데드타임을 인가하여 단독운전 발생 시 주파수가 지속적으로 증가하도록 하는 기법이다. 여기서 인가하는 데드타임의 크기는 cf 라고 하며 식 (7)과 같이 전압의 반주기에 대한 데드타임 인가시간으로 정의된다.

$$cf = \frac{T_z}{T_{grid}} \tag{7}$$

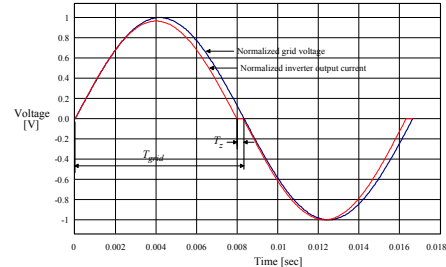


그림 6. AFD 방식의 전압 및 전류 파형
Fig. 6. Voltage and current waveform of AFD method

AFDPF 기법은 AFD 기법의 단점을 개선한 기법으로서 SFS(Sandia Frequency Shift) 기법으로도 나타난다.

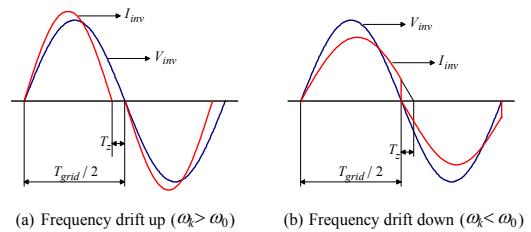


그림 7. AFDPF 방식의 전류 파형
Fig. 7. Current waveform of the AFDPF

AFD 기법의 경우 cf 의 크기와 방향이 고정된 반면 이 기법은 그림 7에서 보이는 것과 같이 계통 주파수 (60[Hz])마다 cf 의 크기와 방향이 가변된다는 점이다. 즉 단자 전압의 주파수를 검출하고 기준 주파수에 대한 오차를 이용하여 cf 의 크기를 결정하는 기법으로서 다음과 같다.

$$cf = cf_0 + K(\omega_k - \omega_0) = cf_0 + K(\Delta\omega) \tag{8}$$

여기서 cf_0 는 주파수 오차가 없는 경우의 cf 를 나타내고, K 는 가속 이득, ω_k 는 단자 전압의 검출 주파수이며 ω_0 은 계통의 기본 주파수를 나타낸다.

4.2 제시한 단독운전 방지기법

제시한 단독운전 방지기법은 계통 전원의 기본 주파수보다 약간 높거나 낮은 동작 주파수의 가상 레지스터로서 계통연계형 인버터가 동작한다. 가상 레지스터는 계통이 공칭 조건일 경우에는 동작하지 않고 계통연계형 인버터는 태양전지의 DC 전력을 AC 전력으로 변환한다. AC 전력을 출력하기 위해 계통연계형 인버터의 출력전류는 공칭의 계통 조건에서 계통전압과 동기화된 정현파로 나타난다. 가상 레지스터의 동작 주파수는 계통연계형 인버터 출력전류의 THD를 높게 하는 계통의 기본 주파수와 고조파 응답으로부터 가상 레지스터를 보호하기 위해 계통의 기본 주파수보다 약간 높거나 낮게 선택된다. 계통이 공칭 조건일 때 부하전압은 계통전압과 일치하고 계통의 시스템 용량이 계통연계형 인버터의 용량보다 매우 크기 때문에 인버터의 가상 레지스터 동작에 따른 영향이 적다. 그러므로 PV 시스템의 계통연계형 인버터 출력전류는 계통전압과 동상의 정현파와 거의 유사하므로 실제 전력으로 사용된다. 따라서 계통연계형 인버터 출력전류의 THD는 단독운전 제어 기준에 THD를 만족하기 위해 낮은 레벨로 유지될 수 있다. 이와 반대로 계통연계형 PV 시스템은 계통전력의 차단이 발생할 때 지역부하에만 전력을 공급하고 계통연계형 인버터의 가상 레지스터가 동작되며 피드백 프로그램이 수행된다. 따라서 계통연계형 인버터의 가상 레지스터의 영향은 지역부하 전압의 주파수와 크기 변화에 큰 영향을 주게 된다. 가상 레지스터의 동작으로 지역부하 전압의 동작 주파수는 가상 레지스터의 동작 주파수 부근으로 이동하게 되고 전압은 크게 변화하게

된다. 이로써 계통연계형 PV 시스템의 단독운전은 검출되고 계통으로부터 분리된다. 그림 8은 계통연계형 인버터를 위한 단독운전 방지기법의 블록도를 나타낸다. 계통연계형 인버터는 전류제어 PWM에 의해 제어된다.

신호의 지령값은 실제 전력 제어신호 S_1 과 가상 레지스터 신호 S_2 를 포함한다. 여기서 실제 전력 제어신호는 계통 전압에서 정현파 신호이다. 계통전압이 식 (10)으로 나타난다면 실제 전력신호는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s(t) = V_s \sin(\omega t) \tag{9}$$

$$S_1(t) = A \sin(\omega t) \tag{10}$$

여기서 A 는 실제 전력 제어신호 S_1 의 크기를 나타낸다. MPPT 제어는 일반적으로 태양전지 어레이로부터 최대전력을 얻기 위한 계통연계형 PV 시스템으로 설계된다. 진폭 A 는 MPPT의 출력신호이며 계통연계형 PV 시스템으로부터 실제로 공급되는 전력의 양으로 측정된다. 첫 번째로 지역부하의 전압은 전압센서에 의해 감지되고, 계통의 기준주파수와 같게 하기 위해 중심 주파수를 갖는 BPF(Band Pass Filter)(I)로 입력된다. BPF(I)의 출력은 실제 전력 제어신호 S_1 의 파형을 나타내고 실제 전력 제어신호 S_1 을 얻기 위해 배율기에서 진폭신호 A 를 곱한다. 신호의 크기 A 는 태양전지 어레이로부터 발생된 에너지의 크기에 의해 결정되는 동안 실제 전력 제어신호 S_1 는 계통연계형 PV 시스템에 의해 발생된 실제 전력을 제어하기 위해 사용된다.

계통전압에 존재하는 고조파 성분의 주파수는 기본 주파수의 정수 배를 갖는다. 가상 레지스터의 동작 주파수는 계통의 기본 주파수와 정수 배의 고조파에 대한 응답으로부터 가상 레지스터를 보호하기 위해 계통의 기본 주파수보다 약간 높거나 낮게 선택된다. 센싱된 지역 부하전압과 BPF(I)의 출력은 감산기에 입력된다. 감산기의 출력은 계통의 기본 주파수와 다른 주파수를 갖는 지역 부하전압의 성분이다. 감산기의

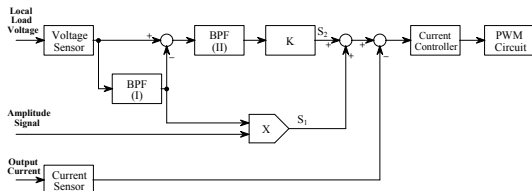


그림 8. 제시한 단독운전 방지 검출 기법의 제어 블록도
Fig. 8. Control block diagram of proposed Anti-islanding detection method

출력은 더 좁은 대역폭을 갖는 BPF(II)에 입력되며 중심 주파수는 기준 주파수보다 약간 높거나 낮게 설정된다. BPF(II)는 지역 부하 전압에서 계통 주파수보다 약간 높거나 낮은 성분의 주파수를 얻기 위해 사용된다. BPF(II)의 출력은 가상 레지스터 제어 신호 S_2 를 생성하기 위한 이득값 K 를 갖는 증폭기에 입력된다. 가상 레지스터는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{virtual} = \frac{K_I}{K_V K} \quad (11)$$

여기서 K_I 와 K_V 는 전류와 전압 센서의 이득값을 나타낸다. 실제 전력 신호 S_1 과 가상 레지스터 신호 S_2 는 계통연계형 인버터의 전류제어를 위한 기준신호를 얻기 위해 가산기에 입력된다.

다음으로 계통연계형 인버터의 출력전류를 측정한다. 레퍼런스 신호와 계통연계형 인버터의 출력전류는 전류 제어기에 입력된다. 마지막으로, 전류제어기의 출력은 계통연계형 인버터를 위한 PWM 신호를 생성하기 위해 PWM 회로에 입력된다. 공칭 조건에서 계통이 지역부하에 직접 연결되기 때문에 지역부하의 전압은 계통전압과 같다. 공칭 조건의 계통은 계통전압의 진폭과 주파수가 제어 표준에 의해 규정된 범위 내에 존재한다는 것을 의미한다. BPF(II)의 입력은 계통전압의 정수 배의 고조파이고 통과 대역이 계통의 기본 및 정수 배의 고조파로부터 떨어져 있기 때문에 가상 레지스터 신호 S_2 는 공칭 조건의 계통에서 거의 "0"이 된다. 계통의 시스템 용량이 계통연계형 인버터보다 크기 때문에 지역 부하전압을 위한 가상 레지스터의 영향은 공칭 계통 조건에서는 무시할 수 있다. 또한 이 조건에서 계통연계형 인버터의 출력전류를 위한 기준신호는 주로 실제 전력 제어신호 S_1 으로 구성되고 계통연계형 PV 시스템은 계통과 동일한 주파수와 위상을 갖는 정현파 전류를 공급한다.

계통이 차단될 경우 지역 부하에 공급할 수 있는 고정된 동작 주파수를 갖는 전압은 없다. 이런 방식으로 계통연계형 인버터의 출력전류는 지역 부하전압을 구축한다. 그리고 가상 레지스터 신호 S_2 가 커지고 계통

의 손실을 야기하는 피드백 효과를 유도한다. 지역 부하전압의 동작 주파수의 증가 또는 감소는 가상 레지스터의 증폭을 야기하고 BPF(II)와 가상 레지스터 제어 신호 S_2 는 계통연계형 인버터가 가상 레지스터와 같이 동작함으로써 급격히 증가하게 된다.

계통의 기본 주파수가 60[Hz]이기 때문에 BPF(I)과 BPF(II)의 중심 주파수는 60[Hz]와 75[Hz] 또는 45[Hz]로 설정할 수 있다. BPF의 대역폭은 10[Hz]로 설정하고 BPF를 위한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_1(s) = \frac{63s}{s^2 + 63s + 142129} \quad (12)$$

$$F_2(s) = \frac{63s}{s^2 + 63s + 22184} \quad \text{or} \quad \frac{63s}{s^2 + 63s + 79863} \quad (13)$$

또한 단독운전 조건 하에서는 가상 레지스터 신호 S_2 가 급격히 증가하므로 계통연계형 인버터의 오픈루프 블록도는 그림 9로 나타낼 수 있다.

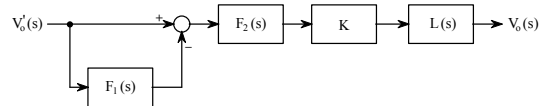


그림 9. 단독운전 조건에서의 오픈루프 블록도
Fig. 9. Open-loop block diagram under islanding condition

$L(s)$ 는 지역 부하의 전달함수를 위해 사용되었으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(s) = \frac{V_o(s)}{I_L(s)} \quad (14)$$

여기서 $V_o(s)$ 와 $I_L(s)$ 은 지역 부하 전압과 전류를 나타낸다. 식 (12)에서 나타낸 것처럼 이득 K 는 가상 레지스터에 반비례하고 전체 시스템의 오픈루프의 이득은 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_o(s)}{V_o(s)} = [1 - F_1(s)]KF_2(s)L(s) \quad (15)$$

이러한 기법으로 지역 부하전압의 동작 주파수는 BPF(II)의 중심 주파수 방향으로 이동하게 된다. 또한 가상 레지스터의 동작은 계통연계형 인버터와 지역부하 사이의 전력 불균형을 야기하고 그 결과 지역 부하 전압을 위한 진폭의 변동이 나타난다. 그러므로 계통연계형 PV 시스템의 단독운전 동작은 지역 부하전압의 진폭과 주파수를 정확하게 검출하게 된다.

5. 시스템 성능결과

그림 10은 계통연계 알고리즘의 성능시험을 위한 PSIM 회로도를 나타낸다. 또한 단독운전 검출의 성능 시험을 위한 IEEE Std. 929-2000 부하의 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 성능시험을 위한 부하 파라미터 값
Table 1. Load parameter value for simulation

파라미터	값	단위
상용전압	220	[V_{rms}]
상용주파수	60	[Hz]
인버터 출력 용량	210	[W]
부하 저항	230.5	[Ω]
부하 인덕터	244.5	[mH]
부하 캐패시터	28.77	[μF]

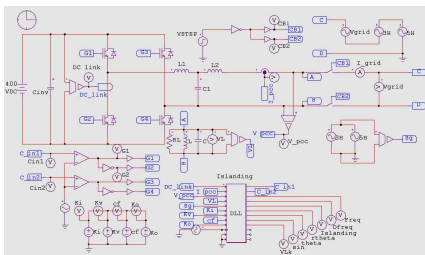
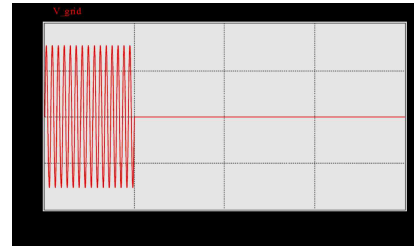
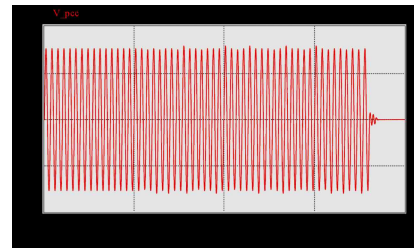


그림 10. 계통연계 알고리즘을 위한 PSIM 회로도
Fig. 10. PSIM circuit for connected grid algorithm

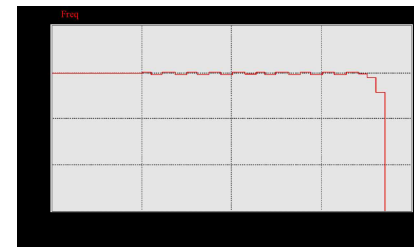
그림 11은 종래의 AFDPF 기법을 이용한 단독운전 방지 제어의 응답특성을 나타내고 있다. 계통 전압의 전체 고조파 함유율은 약 3[%]로 일정하게 설정하였다. 그림 11 (a)는 계통전압, 그림 11 (b)는 인버터 출력의 부하전압, 그림 11 (c)는 주파수 변화 및 그림 11



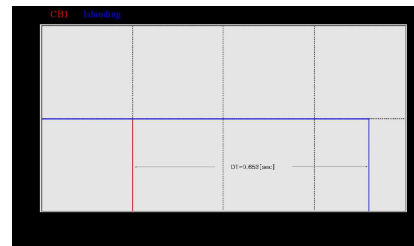
(a) Grid voltage



(b) Load voltage of inverter output



(c) Changing of frequency

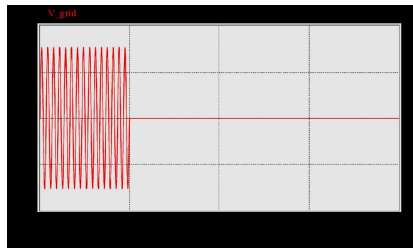


(d) Circuit breaker signal of grid and inverter

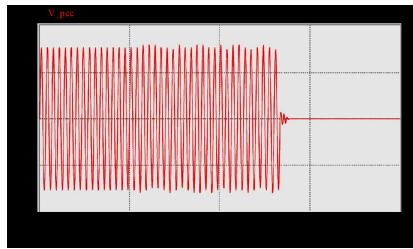
그림 11. AFDPF 기법을 이용한 단독운전 방지의 응답특성($K = 0.028$)

Fig. 11. Response characteristic of Anti-islanding using AFDPF method($K = 0.028$)

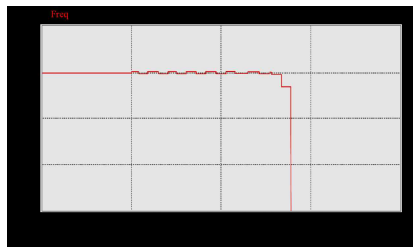
(d)는 계통전원과 인버터 차단신호를 나타내고 있다. 단독운전의 조건은 1[sec]에 계통 전원을 차단시킨 후의 응답특성을 나타내며 cf 를 변화시킬 수 있는 이득 K 값을 0.028로 설정하여 운전하였다. K 값을 0.028로 하였을 경우에는 단독운전을 검출하였으나, 단독운전



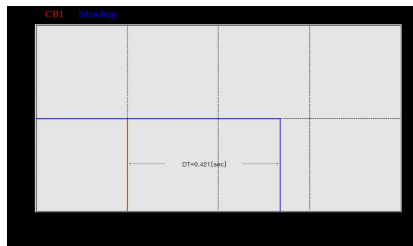
(a) Grid voltage



(b) Load voltage of inverter output



(c) Changing of frequency



(d) Circuit breaker signal of grid and inverter

그림 12. AFDPF 기법을 이용한 단독운전 방지의 응답특성($K = 0.032$)

Fig. 12. Response characteristic of Anti-islanding using AFDPF method($K = 0.032$)

후 0.653[sec] 후에 인버터를 정지시키고 있어 단독운전 검출 최대요구시간 0.5[sec]를 만족하지 못한다.

그림 12는 그림 11과 같은 조건에서 cf 를 변화시킬 수 있는 이득 K 값을 0.032로 설정하여 운전한 응답특성을 나타낸다. K 값을 0.032로 하였을 경우에는 단독

운전 후 0.421[sec] 후에 인버터를 정지시키고 있어 단독운전 검출 최대요구시간 0.5[sec]를 만족하게 나타난다. 이처럼 종래의 AFDPF 기법은 cf 를 변화시킬 수 있는 이득 K 값의 적절한 선택을 통해서만 단독운전을 검출할 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서 사용된 MIC(Module Integrated Converter) 시스템의 실험장치의 사양은 표 2와 같다. 실험장치는 승압용 DC-DC 컨버터와 단상 인버터로 구성된 MIC 시스템의 형태이며 그림 13은 실험에서 사용한 전력변환장치를 나타낸다. MIC 시스템은 PV 모듈입력 및 DC-DC 컨버터부와 DC-AC 인버터부, L-C-L 필터, 제어부 및 데이터 측정부로 구성되었다. 제어부에서 제어를 위해 TMS320LF2406을 사용하였다.

표 2. MIC 시스템의 실험장치 사양

Table 2. Experiment device specification of MIC system

구분	사양
태양전지 개방전압	42.8 [V_{dc}]
태양전지 단락전류	8.42 [A]
태양전지 최적전압	34.6 [V_{dc}]
태양전지 최적전류	6.5 [A]
입력 캐패시터	1200 [μF] /100 [V]
DC 링크단 캐패시터	220 [μF]/450 [V]
변압기 turns ratio	6 (1차측 4 : 2차측 24)
자화 인덕턴스	10 [μH]
누설인덕턴스	0.8 [μH]

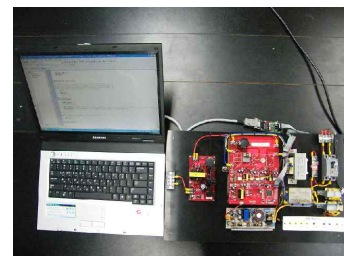


그림 13. 제시한 MIC 시스템의 실험장치

Fig. 13. Experiment device of proposed MIC system

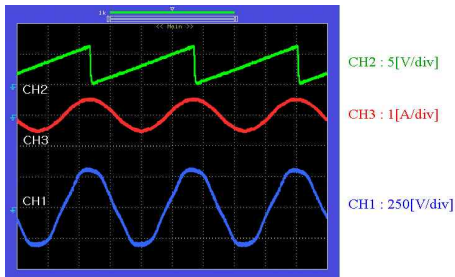
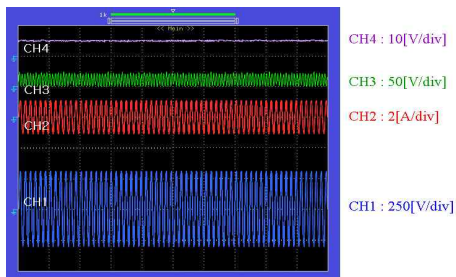


그림 14. 영점 위상 검출에 대한 응답특성
 Fig. 14. Response characteristic with zero-cross phase detection

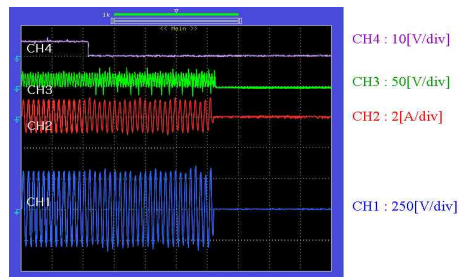
그림 14는 영점 위상검출에 대한 응답특성을 나타낸 것이다. CH1은 60[Hz] 기준신호(계통전압)로 250[V/div], CH2는 영점 위상검출을 통한 추종 위상으로 5[V/div] 및 CH3은 추종 신호(인버터 출력전류) 파형으로 1[A/div]을 나타낸다. 영점 위상검출을 통해 기

준 신호와 추종 신호가 정확하게 일치되고 있으며, PLL 제어를 통한 위상각도 마찬가지로 정확히 일치함을 알 수 있다.

그림 15~17은 제시한 단독운전 방지 알고리즘의 응답특성을 나타낸다. 각 그림의 상부 (a)는 단독운전 방지 알고리즘을 적용하지 않은 경우를 나타내며 하부 (b)는 제시한 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. CH1은 인버터의 부하 전압으로 250[V/div], CH2는 인버터 부하 전류로 2[A/div], CH3은 계통 전원에 투입된 THD로서 50[V/div], CH4는 계통 차단 신호로서 10[V/div]이며 시간은 100[ms/div]을 나타낸다. 그림 15는 계통 전원에 THD를 9.5[%] 투입하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 210[W]로 정격운전 중 계통 전원을 차단시키면 제시한 단독운전 방지 알고리즘에 의해 인버터가 0.413[sec]후에 정지함을 알 수 있다.



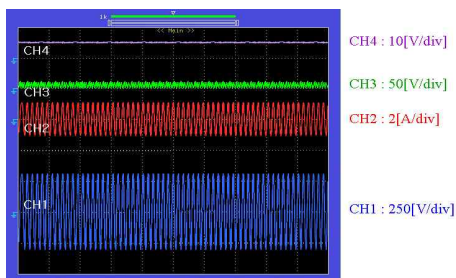
(a) Not applied algorithm



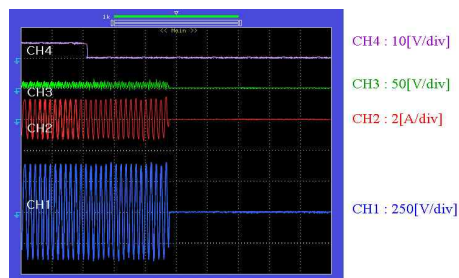
(b) Applied algorithm

그림 15. 제시한 Anti-islanding 제어 알고리즘의 응답특성($V_{THD} = 9.5[\%]$)

Fig. 15. Response characteristic of proposed Anti-islanding control algorithm($V_{THD} = 9.5[\%]$)



(a) Not applied algorithm

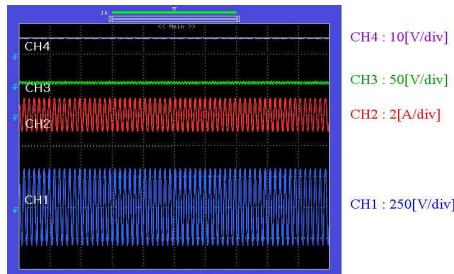


(b) Applied algorithm

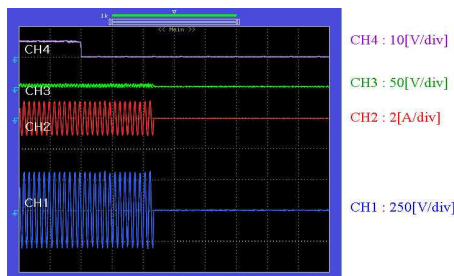
그림 16. 제시한 단독운전 방지 제어 알고리즘의 응답특성($V_{THD} = 3.0[\%]$)

Fig. 16. Response characteristic of proposed Anti-islanding control algorithm($V_{THD} = 3[\%]$)

그림 16은 THD를 3[%]로 설정한 후의 응답특성을 나타낸다. 마찬가지로 계통 차단 후 0.265[sec]후에 인버터가 정지하여 양호한 응답성능을 나타낸다. 그림 17은 THD를 가장 낮은 1.5[%]를 투입한 결과를 나타낸다. 계통전원에 투입된 THD가 가장 낮은 경우에는 계통 차단 후 0.229[sec]후에 인버터가 정지하여 가장 우수한 응답성능을 나타내며, THD가 작아질수록 단독운전 검출을 빠르게 수행할 수 있다. 이는 계통전원의 성분이 거의 기본파에 가깝기 때문에 가상 레지스터의 운전에 의한 THD가 적어도 빠르게 단독운전을 검출할 수 있기 때문이다. 또한 THD를 IEEE Std.929-2000에서 규정한 최대치에 가까운 9.5[%]를 투입하였을 경우에도 국내의 최대 단독운전 요구시간 0.5[sec]를 만족하는 결과를 나타냈다. 이로써 본 논문에서 제시한 가상 레지스터에 의한 단독운전 방지 알고리즘의 우수한 성능을 확인할 수 있다.



(a) Not applied algorithm



(b) Applied algorithm

그림 17. 제시한 단독운전 방지 제어 알고리즘의 응답특성 ($V_{THD} = 1.5[\%]$)
 Fig. 17. Response characteristic of proposed Anti-islanding control algorithm ($V_{THD} = 1.5[\%]$)

6. 결 론

본 논문에서는 계통 연계형 PV 인버터의 단독운전 방지를 위한 새로운 알고리즘을 제시한다. 대표적인 종래의 단독운전 방지 기법으로는 주파수 쉬프트 기법인 AFD와 AFD 기법을 개선한 AFDPF 기법이 있다. 그러나 종래의 기법들은 NDZ가 넓게 분포하거나 설정값에 따라서 단독 운전을 검출하지 못하거나 검출 규격 IEEE Std. 929-2000을 만족하지 못하는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 가상레지스터를 이용한 새로운 단독운전 방지 기법을 제시한다. 가상레지스터는 계통이 공칭 조건일 경우에는 동작하지 않고 계통 전력이 차단되었을 경우에 계통연계형 인버터의 가상 레지스터가 동작되며 피드백 프로그램이 수행된다. 따라서 지역 부하 전압의 동작 주파수가 가상 레지스터 동작 주파수 부근으로 이동하게 되고 전압은 크게 변화하게 된다. 이로써 계통연계형 PV 시스템의 단독 운전이 검출되고 계통으로부터 분리된다. 가상레지스터를 이용한 단독운전 방지 알고리즘은 다양한 동작상태에 대하여 실험을 수행하고 단독운전 방지 검출 규격인 IEEE Std. 929-2000 조건을 만족한 결과를 나타냈다. 따라서 본 논문의 타당성을 입증 할 수 있었다.

References

- [1] J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, "Development of Automatic Tracking Control Algorithm for Efficiency Improvement of PV generation", Trans. KIEE, Vol. 59, No. 10, 2010.
- [2] K. T. Park, J. S. Choi, D. H. Chung, "A novel PV tracking system control considering the power loss with change of insolation", Journal of KIEE, Vol. 22, No. 6. 2008.
- [3] S.A.M. Berhoeven, Utility aspects of grid-connected photovoltaic power systems, IEA_PVPS REport, IEA_PVPS T5-01: 1998.
- [4] Report IEAPVPS T5-09, Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive power systems, International Energy Agency Implementing agreement on Photovoltaic Power System, U.S.A.
- [5] Jung Y, Choi J, Yu B, So J, Yu G, A novel active frequency drift method of islanding prevention for the grid-connected photovoltaic Inverter, In: IEEE 36th power

electronics specialists conference, pp.1915-1921, 2005.

[6] Liu F, Kang Y, Duan S., Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method, In: Twenty second annual IEEE applied power electronics conference, pp.1379-1384, 2007.

[7] H. S. Kim, J. M. Park, K. B. Jo, H. W. L, "A Study on the Boost Converter for MPPT Using Micro-controller in PV System", KSES CNF, pp.51-60, 2003.

[8] Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter Topologies using a Matlab PV model", IEAust, vol. 21, pp. 49-56, 2001.

[9] M. Ropp, Design issue for grid-connected photovoltaic systems, Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1998.

[10] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) System, IEEE Std 929-2000, 2000.

[11] Report IEAPVPS T5-09, Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive power systems, International Energy Agency Implementing agreement on Photovoltaic Power System, U.S.A.

[12] Jung Y, Choi J, Yu B, So J, Yu G., "A novel active frequency drift method of islanding prevention for the grid-connected photovoltaic Inverter", In: IEEE 36th power electronics specialists conference, pp.1915-1921, 2005.

[13] Liu F, Kang Y, Duan S., "Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method", In: Twenty second annual IEEE applied power electronics conference, pp.1379-1384, 2007.

◇ 저자소개 ◇



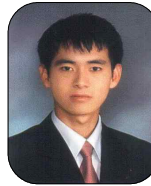
최정식 (崔正植)

1980년 2월 9일생. 2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업. 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011년 1월~현재 전자부품연구원 선임 연구원.

Tel : (062)975-7038

Fax : (062)975-7039

E-mail : cjs1108@keti.re.kr



고재섭 (高在涉)

1980년 2월 2일생. 2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업. 2007년 2월 순천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (061)750-3540

Fax : (061)752-1103

E-mail : kokos22@scnu.ac.kr



정동화 (鄭東和)

1955년 8월 15일생. 1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수.

Tel : (061)750-3543

Fax : (061)752-9841

E-mail : hwa777@scnu.ac.kr