

계통전원 하모닉을 이용한 태양광 발전 시스템의 단독운전 검출기법에 관한 연구

金一松[†]

Study on the Islanding Detection Technique of the Grid-Connected Photovoltaic System using Grid Voltage Harmonic Coefficients

Il-Song Kim

요 약

단독운전이란 계통의 점검이나 사고로 인해 피더가 계통과 분리된 상태에서 태양광 발전설비가 멈추지 않고 운전을 계속하는 것을 의미한다. 정전된 배선 선로가 충전되어 공중감전, 기기손상, 작업원 감전 위험성이 있기 때문에 법적으로 사양이 규제되어 있다. 신재생에너지의 보급이 늘어남에 따라서 단독운전의 검출 기준이나 계통 보호 사양들이 점점 강화되면서 새로운 연구 방법에 대한 요구가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 계통전원의 하모닉 성분을 이용한 단독운전 검출방법에 대해서 다룬다. 태양광 발전 시스템이 계통에 연결되었을 경우와 분리되었을 경우, 계통연결점에서의 등가 고조파 성분이 달라지는 사실에서 하모닉 성분의 변화량으로 단독운전을 판별하는 방법이다. 이 방법의 장점은 기존의 방법보다 비검출 영역을 줄일 수 있고 빠른 검출시간을 가질 수 있다. 또한 계통전원의 외란에 대해서도 강한 특성을 가진다. 고조파 모델링을 이용한 이론적인 해석과 고성능 32-bit 부동소수점 DSP를 이용한 실험결과로서 본 연구의 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a new islanding detection method for a grid-connected photovoltaic system. It is based on the fact that the equivalent harmonic components vary according to the grid connection status. The advantage of the proposed method is the reduced Non-Detection Zone and fast detection time. Also it can have the robust detection capability against grid disturbances. The theoretic analysis using grid-harmonic modeling is performed and verified by test result using 32-bit high performance DSP processor.

Key Words : Islanding detection, Harmonic detection, PCS, DSP

1. 서 론

화석연료의 사용으로 야기되는 환경오염과 고갈로 인해 대체에너지의 발전 비중은 점점 높아지고 있다.

대표적인 신재생 에너지원으로 태양광 발전시스템과 풍력발전 시스템 등이 있다. 이 시스템들의 출력을 계통에 연계시키기 위해서는 계통형 인버터(PCS)를 필요로 하게 된다. PCS는 태양전지에서 발생된 직류전력을 변환하여 교류인 계통에 넘겨주는 장치를 말한다. PCS에 필요한 대표적인 기능으로는 최대전력점추적기(MPPT)와 전류제어기 그리고 단독운전 검출기가 있다.

단독운전이란 계통의 점검이나 사고로 인해 피더

[†]교신저자 : 정희원, 총주대 전기공학과 조교수

E-mail : iskim@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2010. 7. 20

1차 심사 : 2010. 8. 17

심사완료 : 2010. 9. 7

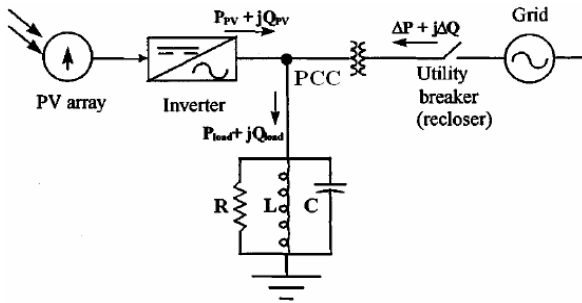


그림 1 단독운전시의 시스템 구성도
Fig. 1 System configuration explaining islanding condition

CB(Circuit Braker)가 분리되어, 계통과 분리된 상태에서 태양광 발전설비가 멈추지 않고 운전을 계속하는 것을 의미한다. 정전된 배선 선로가 충전되어 공중감전, 기기손상, 작업원 감전 위험성이 있기 때문에 법적으로 사안이 규제되어 있다.(IEEE std 2000-929)

그림 1에 단독운전 상황을 설명하는 시스템 구성도가 표시되어 있다. 계통접속점(PCC : Point of common coupling)에서 소모되는 전력과 유입되는 전력의 유효(P), 무효(Q)성분의 크기가 동일한 상황에서 단독운전이 발생하게 된다. 단독운전 상태에서는 아래 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 P_{load} &= P_{PV} \\
 Q_{load} &= Q_{PV} = 0 \\
 \Delta P &= \Delta Q = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

태양광 발전 시스템의 출력전류는 PCC전압과 동상이 되도록 제어되기 때문에 Q_{PV} 는 0이 되므로 $\Delta Q = Q_{PV}$ 가 된다. 따라서 $\Delta Q = 0$ 이 될 조건은 $\omega_a = 1/\sqrt{LC} = \omega_o$ 이다. 이 경우에는 계통이 분리되더라도 LC 공진에 의해 PCC에서의 주파수가 그대로 유지된다.

만약 $\Delta Q > 0$ 이면 $\omega_a < \omega_o$ 이므로 주파수가 증가한다. 한편 $\Delta P = 0$ 인 경우에는 계통이 분리되더라도 태양광 발전 시스템이 부하에서 요구하는 유효전력을 공급하기 때문에 PCC에서의 전압이 그대로 유지되고, $\Delta P > 0$ 이면 전압이 감소하게 된다. 따라서 $\Delta P = \Delta Q = 0$ 인 경우를 제외하면 PCC에서의 전압의 UV/OV와 주파수의 UF/OF만 검출하여 단독운전 상태를 파악할 수 있다.

단독운전 검출에 대한 기존의 연구방법은 크게 수동적인 검출(Passive detection)과 능동적인 검출(Active

detection)로 나누어진다^[1-16].

수동적 검출 방법은 단독 운전 상태에서의 계통전압, 주파수, 고조파 성분의 변화 등을 관찰하는 것이다. 검출 대상은 과전압/저전압, 과주파/저주파, 위상차, THD이다. 이 방법의 단점은 발생전력과 소비전력이 균형을 이룰 경우 단독운전 검출이 어렵다는 것이다.

능동적 검출 방법은 $\Delta P = \Delta Q = 0$ 에도 단독운전 상태를 검출하기 위하여 출력전압, 주파수 또는 위상에 변동을 주어 단독운전 상태에서의 발전량과 부하의 평형상태를 깨트려 적극적으로 대응하도록 동작시키는 것이다. 이 방법은 계통에 크게 영향을 주지 않는 범위에서 인버터 전류에 변화를 주어 부하단 전압이나 주파수에 변화가 발생하면 단독운전 상태로 인식하는 것이다. 대표적인 방법으로는 주파수 바이어스, 샌디아 주파수 변동, 주파수 점프 방법등이 있다. 이 방법들은 모두 계통에 전달되는 파형이나 위상을 변화시키는 것으로 계통에 전달되는 전력을 고의적으로 왜곡시키거나 변형을 가한 후 계통접속점에서 변화를 관찰하는 방법이다. 손실이 크고 고조파 특성이 나빠질 뿐 아니라, 계통에 외란(Sag, Swell)이 발생하거나, 순간 정전시에는 정상 동작하지 못하는 단점이 있다. 또한 발생전력과 소비전력이 균형을 이룰 경우 단독운전 검출을 하지 못하는 불검출 영역(NDZ : Non detection zone)이 존재하게 된다.

태양광, 풍력과 같은 신재생 에너지원이 계통에 더 많이 연결되면서, 계통의 안정성과 전력품질이 악화됨에 따라 단독운전의 규격이나 시험 조건들이 더욱 더 강화되고 있는 추세이다. 예를 들어 최근의 단독운전 시험 조건이 Quality factor 1.0에서 1.5로 강화되었으며, 유럽의 VE 규격에 residual current 검출이나 grid impedance 검출과 같은 계통 보호 규격들이 계속해서 추가되고 있는 상황이다.

따라서 계속 강화되는 인증기준이나 시험 기준에 대비하기 위해 기존에 연구방법과는 전혀 다른 새로운 단독운전 검출에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 계통전원의 하모닉 성분들을 이용하여 그 변화량을 검출함으로써 단독운전 상태를 알아내는 방법을 연구한다. 제안된 방식은 기존에 사용되었던 수동적인 방법이나 능동적인 방법을 사용하지 않고 계통전원의 하모닉 변화를 파악함으로써 단독운전 여부를 판정한다. 이 방식은 수동적인 방법에서 사용하였던 전압, 주파수의 경계치에 의존하지 않기 때문에 발생전력과 소비전력이 균형을 이룰 경우에도 단독운

전 검출이 가능하여 NDZ가 감소하는 장점이 있으며, 능동적인 방법에서 사용하였던 주파수 변동법이나 전력변동법 보다는 고조파 특성과 효율이 좋아진다. 또한 기존의 방식은 계통에 외란(Sag, Swell)이 발생할 경우 이를 단독운전으로 판단하는 오동작의 가능성이 있으나, 제안한 방식은 외란 상황에서도 계통의 하모닉 성분 변화는 크지 않기 때문에 단독운전 상황으로 판단하지 않는다. 따라서 계통외란에 대해서 강인한 장점을 가지게 된다.

태양광 발전 시스템의 고조파 모델을 이용한 이론적인 해석과 고성능 DSP를 이용한 제어기 시험으로 본 연구의 타당성을 입증하였다.

2. 고조파 모델링

그림 2에 고조파 하모닉으로 이루어진 등가회로를 보여주고 있다. DC link 전압을 포함한 인버터측의 고조파 하모닉 성분은 전류원 I_{f-h} 로 모델링되며, 계통전원은 하모닉 성분을 포함한 전압원으로 모델링되며 V_{g-h} 로 표현된다. 계통의 임피던스는 이상적인 소자값 (R_g, L_g)로 표현된다. 시험부하는 Quality factor $Q = 1.5$ 을 가지는 공진부하 (R_L, C_L, L_L)로 이루어져 있다. 단독운전 검출에 필요한 시험부하와 시험환경 설정은 IEEE Standard 929-2000에서 제시한 방법에 따라 정해진다. 이 그림에서는 계통전원의 하모닉 성분은 모두 V_{g-h} 에 포함되었다고 가정하였다. V_{g-h} 의 기본성분 (fundamental component)의 고조파 왜곡률(THD : Total Harmonic Distortion)은 스위치 SW의 상태에 의해 미약하게 변화하나, 전체적으로는 일정하게 된다. 하모닉 성분을 포함한 계통전압 $V_g(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$V_g(t) = V_1 \cos(\omega t) + V_2 \cos(2\omega t) + \dots V_n \cos(n\omega t) \quad (2)$$

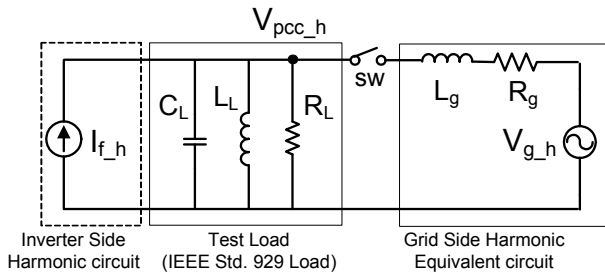


그림 2 PCS의 고조파 등가회로
Fig. 2 Harmonic equivalent circuit for PCS system

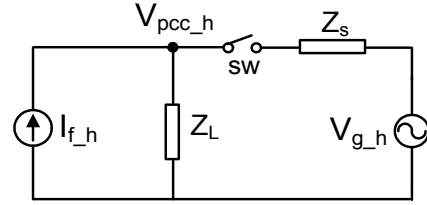


그림 3 단독운전시 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit for islanding operation

ω 는 기본파 주파수로 60Hz 정현파의 경우 377[rad/sec]이다. 기본파 성분을 제외한 계통전원의 하모닉 방정식은

$$V_{g-h}(t) = V_2 \cos(2\omega t) + V_3 \cos(3\omega t) \dots V_n \cos(n\omega t) \\ = \sum_{n=2}^N V_n \cos(n\omega t) \quad (3)$$

정현파 unipolar 변조기법을 사용한 단상 풀브리지 형태의 출력전류의 고조파 방정식은

$$I_{f-h} = \sum_{n=1}^N \left(\left| \frac{I_n}{n} \sum_{i=1}^k (-1)^{i+1} \cos n\alpha_i \right| \right) \quad (4)$$

k는 기본파를 포함한 제어 가능한 고조파 성분의 숫자이고, α 는 스위칭 각이다.

그림 3에서 단독운전 발생시, 스위치 SW가 개방되면 PCC에서의 하모닉 전압원 V_{pcc-h} 는 변화하게 된다. 이것을 계통전압에서의 복소 임피던스로 나타낼 수 있다. 계통 접속점(PCC)의 고조파 성분 전압은

$$V_{pcc-h} = \frac{Z_L}{Z_s + Z_L} V_{g-h} + Z_L I_{f-h} \quad (\text{sw on}) \quad (5)$$

$$V_{pcc-h} = Z_L I_{f-h} \quad (\text{sw off}) \quad (6)$$

여기에서

$$Z_s = R_s + j\omega_h L_s,$$

$$Z_L = R_L \parallel j\omega_h L_L \parallel \frac{1}{j\omega_h C_L} \parallel (R_g + j\omega_h L_g) \quad \text{로}$$

주어진다.

스위치 SW의 상태에 의해 PCC단의 등가저항이 달라져 고조파전압의 크기 V_{pcc-h} 이 변화하게 된다. 따라서 PCC전압 V_{pcc-h} 변화율 대비 기본 고조파 성분

$V_{g,h}$ 변화율은 주파수 성분에 따라서 달라지게 되어

$$\left| \frac{\partial V_{pcc,h}}{\partial V_{g,h}} \right|_{on} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_s} \quad (7)$$

$$\left| \frac{\partial V_{pcc,h}}{\partial V_{g,h}} \right|_{off} = 0 \quad (8)$$

식(7), (8)에서 스위치 상태 SW에 따라 $V_{pcc,h}$ 대비 $V_{g,h}$ 변화율이 달라지게 되어, 감도를 계산하면 단독운전 상태를 결정할 수 있다.

3. 고조파 성분 검출을 위한 DFT 계산

계통전원과 같은 일정한 주파수 (60Hz)를 갖는 신호의 하모닉 성분을 알아내는 대표적인 방법으로 이산 푸리에 (DFT : Discrete Fourier Transform) 변환이 있다. 이 방식은 이산 주기 신호 $g(k)$ 의 N 개의 신호를 푸리에 변환에 의해서 N 개의 주파수 성분 신호로 변환하는 것이다[17-18]. 변환된 주파수 신호는 N/2 개의 실수부와 N/2개의 허수부로 구성된다.

N-개의 이산 주기 신호 $g(k)$ 의 이산 푸리에 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$G(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n)W_N^{kn}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (9)$$

수식 (9)의 값들의 정의는 다음과 같다.

$$W_N^{kn} = e^{-j2\pi kn/N} : \text{twiddle factor}$$

N : 한주기내의 샘플링 갯수

크기(Magnitude)를 구하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(k) &= G_{re}(k) + jG_{im}(k) \\ |G(k)|^2 &= G_{re}^2(k) + G_{im}^2(k) \end{aligned} \quad (10)$$

최종적으로 얻어진 결과의 해석은 다음과 같다.

N 개로 이루어진 입력 신호 $g(n)$ 의 N-point DFT 결과 $G(k)$ 는 신호의 주기 f_s 를 N으로 균등배분한 주파수 밴드의 크기 성분이 된다. 예를 들어 60 Hz 주파수를 갖는 220 Vac를 15360 Hz로 샘플링한 256 - DFT한 결과값 $G(0), G(1), G(2), \dots, G(256)$ 은 0 Hz, 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, ... 15,360 Hz 의 주파수 성분에 해당하는 하모닉 성분의 크기가 된다.

4. 제어기 설계 및 제작

PCS의 동작과 계통전원 하모닉 계수를 얻어내기 위한 DFT 계산을 위해서는 복잡한 계산 능력과 빠른 연산속도를 필요로 한다. 제작된 제어기는 TMS320F28335로 32-bit floating point DSP controller이다. 150 MHz의 주파수로 동작하여 300 MFLOPS의 연산능력을 갖는다^[19]. 고정밀도의 바이폴라 입력범위($\pm 10V$)를 갖는 외장 ADC 보드를 사용하여 아날로그 신호를 최대의 정밀도로 디지털 변환하여 푸리에 변환에 사용하였다. DSP에서 계산된 DFT 계수는 직렬 통신을 통하여 컴퓨터에 저장된다. 그림 4에 시스템 구성도가 나타나 있다.

계통전원 한주기에 256-point DFT를 수행하기 위해 스위칭 주파수를 15.36 [Khz]로 정하여 매 인터럽트 루틴마다 전압, 전류의 ADC 변환과 전류제어를 행하였다.

256-point DFT 연산시간은 900us 이내이고 단독운전 검출 알고리즘을 포함한 총 연산시간은 1ms이다. 따라서 계통전원의 한 주기 내에서 단독운전 검출이 가능하다. 단독운전 검출을 위한 알고리즘 순서도는 다음과 같다. Zero-crossing에서 flag를 1로 만든 후 버퍼의 index를 0으로 한다. 매 샘플링 시간마다 계통 전압값을 버퍼에 저장한 후 전류제어를 행한다. 그림 5에 인터럽트 루틴에서의 동작을 설명하고 있다.

메인루틴에서는 flag가 1 이 되면 버퍼에 저장된 256개의 계통 전압값을 이용하여 DFT를 수행한다. DFT 계수를 전단계의 계수와 비교한 후, 차이의 합을 구하여 $\Delta Coef$ 라 한다. 이 값이 설정값 $\Delta level$ 보다 클 경우 카운트 값을 증가시킨다. flag를 0으로 만든 후 하모닉 계수값을 old에 보관한 후 처음으로 돌아간다.

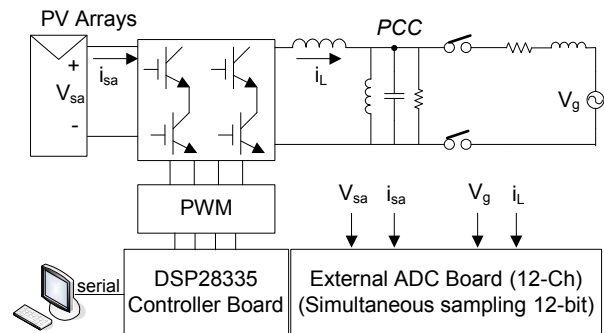


그림 4 시스템 구성도
Fig. 4 System configuration

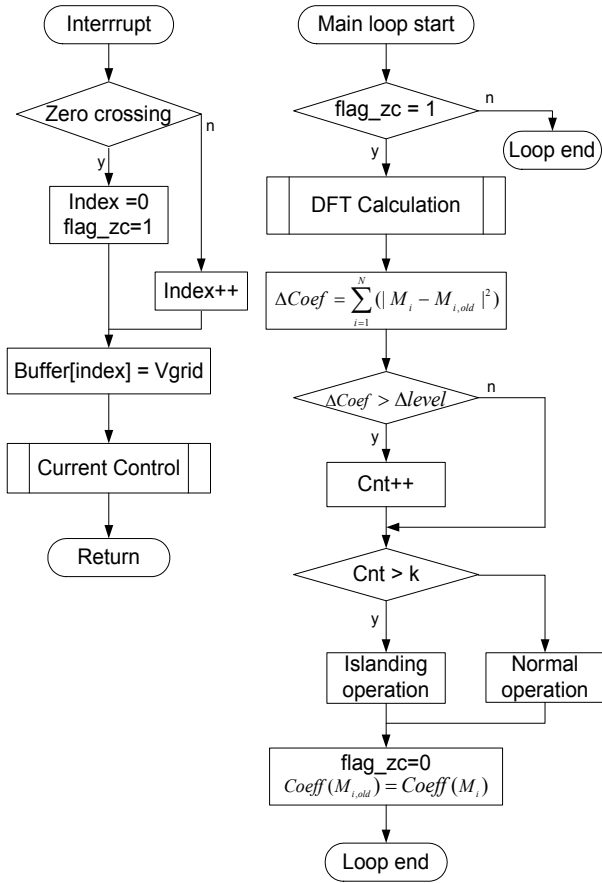


그림 5 단독운전 검출을 위한 제어순서도
Fig. 5 Control diagram for islanding detection

매주기마다 위의 과정을 반복하여 카운트값이 일정한 값 이상일 경우 단독운전으로 판정하여 PCS의 운전중지를 지시시킨다.

$\Delta level$ 의 결정은 이론적으로 정립되어진 것은 없지만, 보다 확실한 검출을 위해서 $0.88V_{nom} \leq V \leq 1.10V_{nom}$ (실험에서 $V_{nom} = 220V$) 전압범위에서의 하모닉 계수 변동분의 2~3배로 결정하는 것이 적절함이 실험적으로 얻어졌다.

그림 6에 단독운전 시험용 RLC 부하 실험세트가 나타나 있다. 유효전력 P를 흡수하기 위한 가변 저항과 무효전력 변동분 ΔQ 를 수용하기 위한 L과 C로 구성되어 있다. ΔQ 를 변동시키기 위해 두종류의 L과 여러조합의 C로 구성되어 있다. 그림에서는 $L=58.6 [mH]$ 와 $C=120 [uF]$, $R=30[\Omega]$ 의 조합이 나타나 있다. 이러한 구성은 $Q_L = 2190[Var]$, $Q_C = 2190[Var]$, $P_R = 1600[W]$, $Q_f=1.35$ 의 값을 가진다.

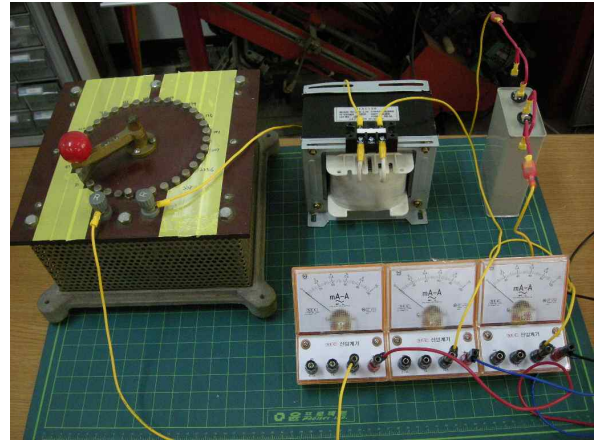
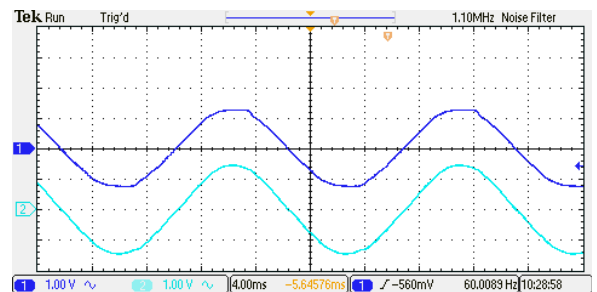
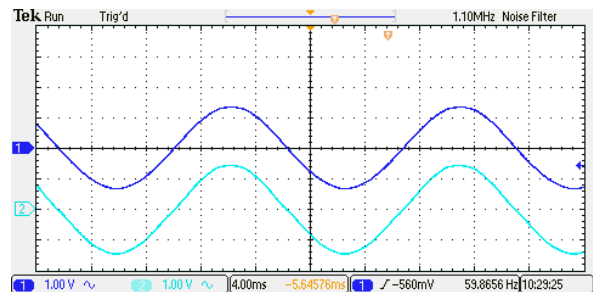


그림 6 단독운전 시험용 R-L-C 부하
Fig. 6 R-L-C Load for islanding test



(a) 단독운전 발생 전의 계통전압[Ch1], 전류파형[Ch2]



(b) 단독운전 발생 후의 계통전압[Ch1], 전류 파형[Ch2]

그림 7 단독운전 발생 전,후의 계통전압, 전류 파형
Fig. 7 Voltage and current waveform for islanding period

그림 7에 단독운전 발생 전과 발생 후의 계통전압 [Ch1], 전류파형[Ch2]을 보여주고 있다.

단독운전 발생전의 파형은 하모닉을 포함하고 있는 왜곡된 계통전압 파형을 보여주고 있으며, 단독 운전 발생 후의 파형은 L-C 공진에 의해 60 Hz의 pure sine 파형을 보여주고 있다.

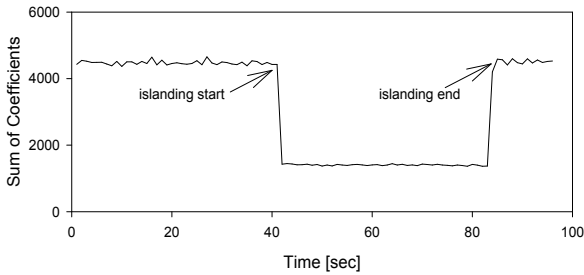


그림 8 하모닉 계수를 이용한 단독운전 검출실험 결과
 Fig. 8 Experimental result for Islanding detection using harmonic coefficients

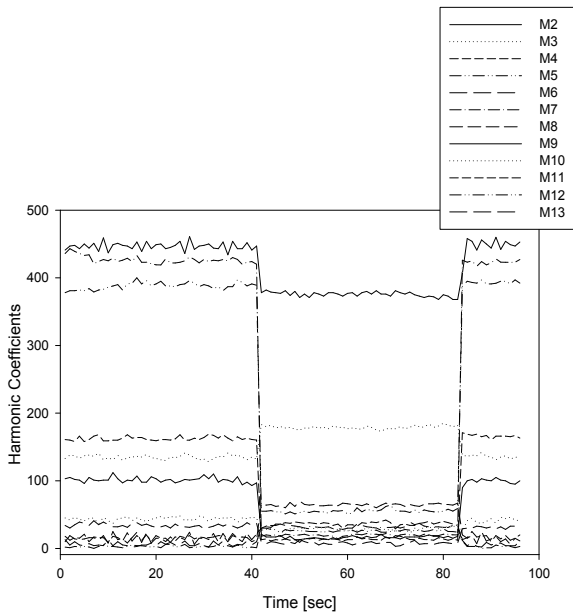


그림 9 단독운전 발생시의 하모닉 계수들의 변화그래프
 Fig. 9 Harmonic components variation graph during islanding operation

두 파형을 비교해 보면, 크기와 주파수는 모두 동일하기 때문에 기존의 단독운전 검출 방법으로는 검출이 어렵다. 두 파형의 가장 큰 차이점은 계통전압에 포함된 고조파 성분의 크기이다.

즉 위의 그림에서 알 수 있듯이, 계통전압 파형의 왜곡에 의해서 단독운전 여부를 판단할 수 있다. 계통전압 파형 왜곡은 하모닉 계수들의 크기 값으로서 얻어진다.

그림 8에 하모닉 계수를 이용한 단독운전 검출 실험 결과가 나타나 있다. 계통 전원의 매 주기마다 하모닉 계수들을 계산하여 그 합을 저장하였다. 그림에서 알

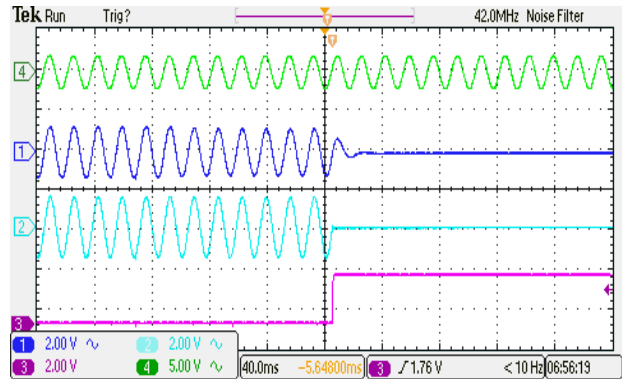


그림 10 단독운전 검출 파형
 Fig. 10 Waveform during islanding detection operation

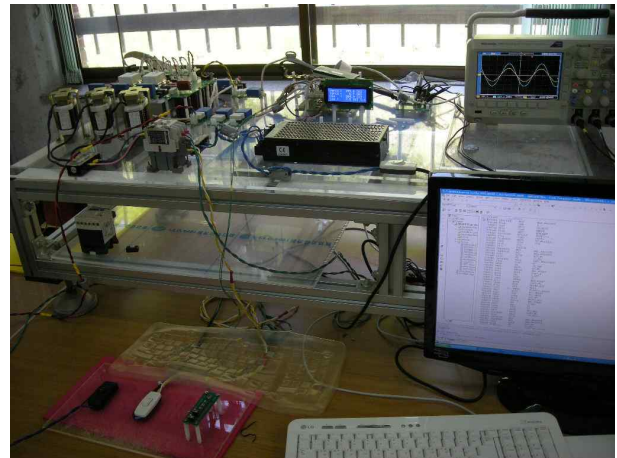


그림 11 단독운전 시험 시스템 구성
 Fig. 11 Islanding test system configurations

수 있듯이 40초에서 단독 운전이 발생하여 82초까지 유지되고, 그 후에 다시 정상운전 상태로 복귀한 것을 알 수 있다.

그림 9에 단독운전 발생시의 하모닉 계수 각각의 변화를 도식화 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 단독운전이 발생할 때, 9차 하모닉을 포함한 대부분의 하모닉 성분이 감소하지만, 3차 하모닉처럼 증가하는 성분도 있다.

그림 10에 단독운전 검출시의 파형을 보여주고 있다. 첫 번째 파형은 계통전압이고, 두 번째 파형은 PCC에서의 전압파형, 세 번째 파형은 계통 전류이고, 네 번째 파형은 단독운전 flag 값이다.

그림 11에 단독운전 시험에 사용되었던 시스템 구성을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통전원 하모닉을 이용한 태양광 발전 시스템의 단독운전 검출기법에 관한 방법을 연구하였다. 단독운전이 발생하기 전후의 하모닉 계수들의 크기가 달라진다는 사실을 이론적인 모델링과 실험결과로서 입증하였다. 고성능 DSP 프로세서를 이용하여 1[ms]이내에 단독운전 여부를 결정할 수 있었다. 기존의 수동적인 검출방법보다 감소된 비검출 영역을 가지고 있으며 능동적인 검출 방법보다는 고조파왜곡이 감소하고 외란에 강인한 장점을 가지고 있다.

본 연구의 결과는 앞으로 강화될 분산전원 분야의 인증 규격들에 효과적으로 대응이 가능하기 때문에 많은 응용 분야에 적용될 것을 기대하고 있다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초 전력연구원(20091020300130) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] C. Jeraputra, P.N. Enjeti, "Development of a robust anti-islanding algorithm for grid interconnection of distributed fuel cell powered generation", *IEEE Trans. power electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1163-1170, 2004, Sep.
- [2] R.A. Jones, T.R. Smith, A.F. Imece, "Investigation of potential islanding of self commutated static power converter in potovoltaic system", *IEEE Trans. energy conversion*, Vol. 5, No. 4, pp. 624-631, 1990, Dec.
- [3] V. Task, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic grid-interactive power systems", Tech. Rep. IEA-PVPS T5-09, 2002, Dec.
- [4] Z.Ye, A.Kolwalkar, Y.Zhang, P.Du, R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept", *IEEE Trans. power electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1171-1176, 2004, Sep.
- [5] M.E. Ropp, M. Begovic, A. Fohatgi, G.A. Kern, "Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones", *IEEE Trans. energy conversion*, Vol. 15, No. 3, pp. 290-296, 2000, Sep.
- [6] M.E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention", *IEEE Trans. energy conversion*, Vol. 14, No.3, pp. 810-816, 1999, Sep.
- [7] Luiz A.C. Lopes, Huili Sun, "Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods", *IEEE Trans. energy conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 171-180, 2006, Mar.
- [8] Luiz A.C. Lope, Yongzheng Zhang, "Islanding detection assesment of multi-inverter systems with active frequency drifting methods", *IEEE Trans. power delivery*, Vol. 23, No. 1, pp. 480-486, 2008, Jan.
- [9] G.K. Hung, C.C. Chang, C.L. Chen, "Automatic phase shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverter", *IEEE Trans. energy conversion*, Vol. 18, No. 1, pp. 169-173, 2003, Mar.
- [10] 유병규, 정영석, 마키히코 마츠이, 유권중, "유효전력변동 방식을 이용한 새로운 단독운전 검출기법 연구", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 213-215, 2006.
- [11] 김홍성, 김한구, 최규하, 김재철, 최영호, "IEEE 929-2000 단독운전 시험조건 하에서 단상 계통연계형 PV 시스템의 Anti-islanding을 위한 RPV 방식 및 AFD 방식의 해석 및 설계", *전력전자학회 논문지*, 제12권, 제1호, pp. 37-49, 2007. 2.
- [12] 고재석, 채영민, 강병희, 최규하, "고주파 주입에 의한 계통연계형 태양광 발전시스템의 고립운전 검출", *전력전자학회 논문지*, 제8권, 제2호, pp. 199-210, 2003. 4.
- [13] Houshang Karimi, Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, "Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit", *IEEE Trans. power electronics*, Vol. 23, No. 1, pp. 298-307, 2008, Jan.
- [14] Guillermo Hernandez, Reza Iravani, "Current injection for active islanding detection of electrically-interfaced distributed resources", *IEEE Trans. power delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1698-1705, 2006, July.
- [15] Lucian Awiminoaei, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg, "A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection", *IEEE Trans. power electronics*, Vol. 20, No. 6, 2005, Nov.
- [16] Marco Liserre, Alberto Pigazo, Antonio Dell, Victor M. Moreno, "An anti-islanding method for single-phase inverters based on a grid voltage sensorless control", *IEEE Trans. industrial electronics*, Vol. 53, No. 5, pp. 1418-1426, 2006, Oct.
- [17] Sunt Srianthumrong, Somboon Sangwongwanich, "An active power filter with harmonic detection method based on recursive DFT", *IEEE 8th international conference on harmonic and quality of power*, Athens, pp. 127-132, 1998, October.
- [18] R. Hartley, K. Welles, "Recursive computation of the fourier transform", *IEEE Int. Symposium on circuit and system*, Vol. 3, pp. 1792-1795, 1990.
- [19] TMS320F28335 Data Manual, Texas Instruments

저 자 소 개



김일송(金一松)

1968년 7월 3일생. 1991년 연세대 공대 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2005 동대학원 졸업(공학박) 2007년 3월~현재 충주대 전기공학과 조교수.