[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 17, No. 1, 1997

계통연계 태양광발전시스템용 단상 인버터의 설계 및 제어

황인호* · 성세진**

* 전력연구원 에너지환경고등연구소
** 충남대학교 전기공학과

Design and Control of the Single-phase Inverter for Utility Interactive Photovoltaic Generation System

In-Ho Hwang*, Se-Jin Seong**

** Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)*
*** Chungnam National Univ., Dept. of Electrical Eng.*

요 약

최근 태양전지, 연료전지를 이용한 새로운 발전시스템이 개발중에 있다. 특히 소규모 분산형 계통연계 태양광발전시스템은 가까운 장래에 폭 넓게 보급될것으로 예상된다.

태양전지 어레이를 계통선과 결합하는데 사용되는 인버터는 전체 태양광발전시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 고조파를 포함한 무효전력 보상능력을 갖는 단상 태양광 인버터 시스템의 설계 및 제어기법을 제시하였다. 제안된 인버터 시스템에 의해 정류기 부하에 의해 발생된 무효전력이 보상될 수 있음을 실험결과로 보여준다.

Abstract

Recently, new generation systems using solar cells or fuel cells are under development. Particularly, it is expected that small scale, utility interactive, dispersed PV system will be widely diffused in the near future.

The inverter used in coupling the PV array with utility lines is an important factor determining the overall performance of power generation systems.

This paper presents the design and control method of the single-phase PV inverter system that is capable of compensating reactive power including harmonic distortions.

It is shown that reactive power caused by rectifier load can be compensated by the proposed inverter system.

1. 서 론

태양광발전시스템의 응용분야중 향후 가장 많이 실용화 보급잠재력을 갖고 있는 계통연계형 시스템은 주택용, 빌딩용 또는 기타 계통과 연계되어 있는 분산형 전원 형태의 시스템으로 수kW에서 수MW용량의 계통연계 인버터를 필요로 한다[1]. 이러한 상황을 인식하여 선진국등에서는 태양광발전을 비롯한 대체에너지전원의 계통연계와 관련한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 국내에서는 관련법령의 미비등 제반여건이 성숙되어 있지 않기 때문에 그 연구실적은 미미한 실정이다.

태양전지를 전원으로 하는 계통연계형 인버터는 상용 전력계통과 병렬 접속하는 배전선의 상태 변화에 대한 추종성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압 변화에 대한 적응능력, 계통 사고시에 적절히 대응하는 기능 및 자체 발생 고조파로 인한 통신유도 장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 한다[2].

유효 전력, 무효 전력을 조절하고 계통선 시스템을 안정화, 효율화하는 기능이 부가될 경우 액티브 필터(Active filter)의 특성과 유사하며, 낮은 THD, 높은 효율, 병렬운전의 관점에서는 독립형 인버터와 비슷하다. 또한 최대출력 제어를 행하는 점에서는 MPPT 전력조절기의 특성이 요구됨을 알 수 있다[3][4].

본 논문에서는 최근에 정류기를 비롯한 반도체 전력변환장치의 사용이 급증함에 따라 배전계통에서 고조파로 인한 전력품질 저하 등의 문제가 발생됨을 감안하여 주택용등에 적용이 가능한 단상 계통연계형 태양광발전시스템에 있어서 고조파를 포함한 무효전력 보상능력을 갖는 인버터의 설계 및 제어기법을 제시하고, 그 동작특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검토하고자 한다.

2. 시스템 모델링

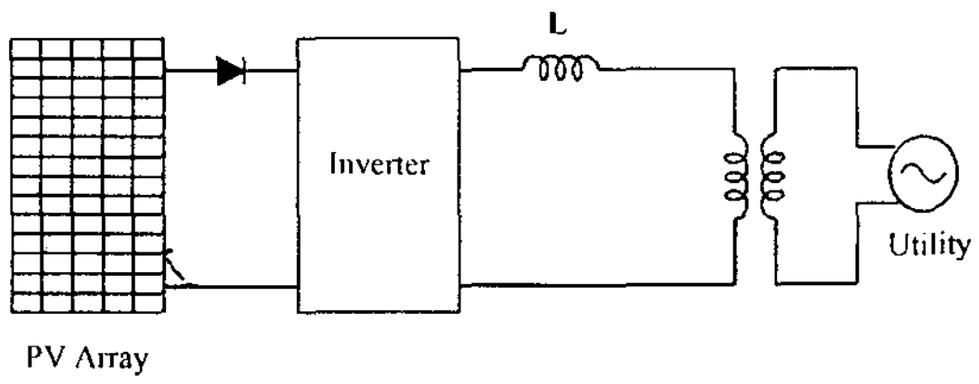


Fig. 1 System configurtion

일반적으로 단상 계통연계형 태양광 인버터 시스템은 Fig. 1과 같은 회로로 구성할 수 있다. 계통선의 선로 임피던스는 인버터 시스템의 출력 변압기의 누설 인덕턴스에 포함시켰고, 계통선은 선로 임피던스가 영인 전압원 $V_u = V_{um} \sin\omega t$으로 모델링 하였다. 계통선로와 인버터 시스템과의 전기적인 절연 및 인버터 사고, 상용 전력계통 이상 발생시에 상호간의 보호를 위하여 삽입한 절연 변압기는 변압기의 누설 인덕턴스 L로 모델링 하였다. 따라서 연계형 인버터 시스템은 리액터 L을 사이에 두고 계통선과 직렬 연계된 모양으로 생각할 수가 있다.

Fig. 1에 보여진 태양광시스템은 이상적인 경우를 가정하여 Fig. 2와 같은 등가회로로 표현할 수 있다.

Fig. 2의 등가회로로부터 연계형 인버터 시스템의 모델링을 하기 위하여 먼저 인버터의 교류측의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_u = L\frac{di_a}{dt} + Ri_a - (V_{PN} - V_{NO}) \quad (1)$$

(1)식으로 부터 스위치, S_1, S_1'를 스위칭 함수를 d_1, d_1'라 하면 다음과 같은 식이 성립된다.

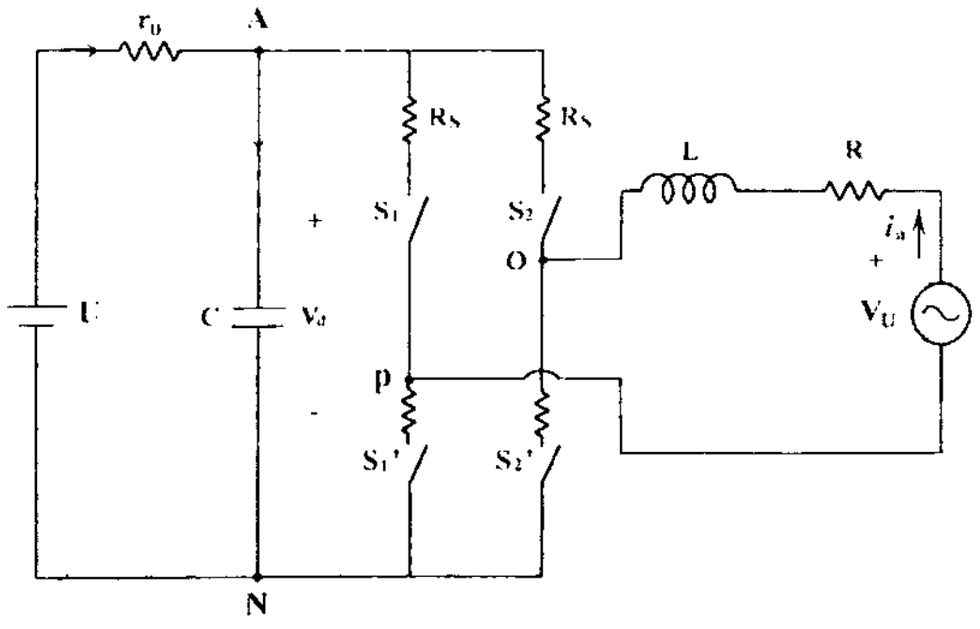


Fig. 2 Equivalent circuit of grid-connected PV system

$$V_u = L\frac{di_a}{dt} + Ri_a - (V_{PN} - V_{NO}) \quad (2)$$

유사한 방법으로 스위치 S_2와 S_2'에 대한 전압방정식은 스위칭 함수 d_2, d_2'를 사용하여

$$V_u = L\frac{di_a}{dt} + Ri_a - (V_d d_2 - V_{NP}) \quad (3)$$

으로 표시될 수 있다.

식 (2)는 식 (3)과 동일하므로 다음 관계식이 얻어진다.

$$V_{p0} = V_d(d_1 - d_2) \quad (4)$$

(4)식을 (1)식에 대입하면, 스위칭 함수 d_1, d_2를 이용한 전압방정식을 구할 수 있다.

$$V_u = L\frac{di_a}{dt} + Ri_a - V_d(d_1 - d_2) \quad (5)$$

또한, Fig. 2에 보여진 연계형 인버터의 직류측 노드 A로 부터

$$C\frac{dV_d}{dt} = -d_1 \cdot i_a + d_2 \cdot i_a + \frac{U - V_d}{r_0} \quad (6)$$

여기서 r_0 : 태양광 어레이 직렬저항

U : 태양광 어레이 출력전압

식 (5), (6)으로 부터 상태공간 모델링을 통한 전체 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\dot{Z}_x = A^* x + Be \quad (7)$$

여기서, $x = [i_a \ V_d]^T$

$$A^* = \begin{vmatrix} -R & d_1 - d_2 \\ d_2 - d_1 & -\frac{1}{r_0} \end{vmatrix},$$

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_0} \end{vmatrix}, \quad Z = \begin{vmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{vmatrix},$$

$$e = [V_u \ U]^T$$

이다.

위 식은 단상 계통연계 태양광 발전시스템에 대한 일반적인 수학적 모델을 제시한다고 할 수 있다.

3. 무효전력보상 알고리즘

PWM인버터는 교류출력 전류를 제어해서 직류측과 교류측의 전력흐름, 즉 유효전류 성분과 무효전류 성분을 제어할 수 있다. 유효전류 성분은 교류측 전압과 동기인 정현파 전류성분으로 정의된다. 이 경우에는 교류측 전압은 계통선 전압을 의미한다. 무효전류 성분은 인버터 출력전류로부터 유효전류성분을 뺀 나머지 전류성분으로 정의된다. 즉 유효전류 성분은 유효전력을 전달하고, 무효전류성분은 무효전력을 전달한다.

따라서 유효전류 성분은 태양전지로 부터 계통선으로 전력 흐름을 최대화하기 위해 제어되고, 무효전류성분은 계통선에서 무효전력과 고조파를 보상하기위해 제어될수 있다.

일반적으로 시스템에 연결되어 있는 부하전류 i_L은 다음과 같이 두성분으로 나뉘어진다.

$$i_L = i_{active} + i_{reactive} \quad (8)$$

여기서 유효전류 성분 i_{active}는 계통선 전압과 동기인 정현파 전류로 정의된다. 그리고 무효전류 성분 $i_{reactive}$는 i_L로부터 i_{active}를 뺀 나머지 전류성분으로 정의된다. 만일 인버터가 똑같은 전류(즉 $i_C = i_{reactive}$)를 공급할수 있다면, 계통선 전류 i_P는 다음과 같이 된다.

$$i_P = i_L - i_C$$
$$= (i_{active} + i_{reactive}) - i_{reactive} = i_{active} \quad (9)$$

이 관계식은 계통선 전류 i_P가 단지 무효전류 성분이 없이 유효전류 성분만 포함하고 있음을 나타낸다. 즉 무효전력이 계통선에서 보상됨을 의미한다. Fig. 3은 역율보상이 가능한 시스템 구성도를 보여주며, 보상전류 합성을 위한 첫번째 단계로 부하전류내의 유효전류성분의 크기, I_{LP}는 다음식에 의해 계산된다.

$$I_{LP} = \frac{2}{\pi V_P} \int_0^{\pi} (VP' i_L) dt \quad (10)$$

여기서 Vp'는 계통선 전압 V_u와 같은 위상 및 크기를 갖는 신호이고, Vp는 그 크기이며, i_L은 순시 부하전류이다. I_{LP}와 Vp'의 곱에 의해 얻어진 신호 i_{LP}는 i_{active}와 같다. 마지막으로 i_L로부터 i_{LP}를 빼서 얻어진 전류신호, i_{Cref}는 보상되어야 할 무효전력 성분인 $i_{reactive}$와 같은 전류신호이다.

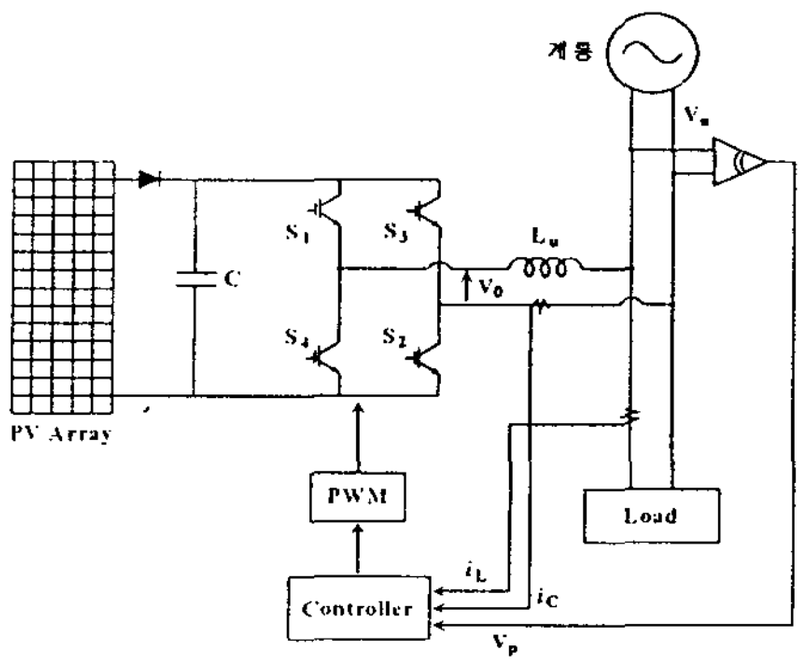


Fig. 3 Single-phase PV inverter system

i_{Cref}는 기본파뿐만아니라 고조파까지의 무효전류 성분을 포함하고 있다. 왜냐하면 i_{Cref}자체에 고조파성분을 포함하고 있기 때문이다. 이것은 인버터가 i_{Cref}를 공급할 때 고조파를 포함한 무효전력이 보상될수 있음을 의미한다. 결과적으로 i_{Cref}는 인버터의 전류제어 loop에서 기준전류신호로 사용된다.

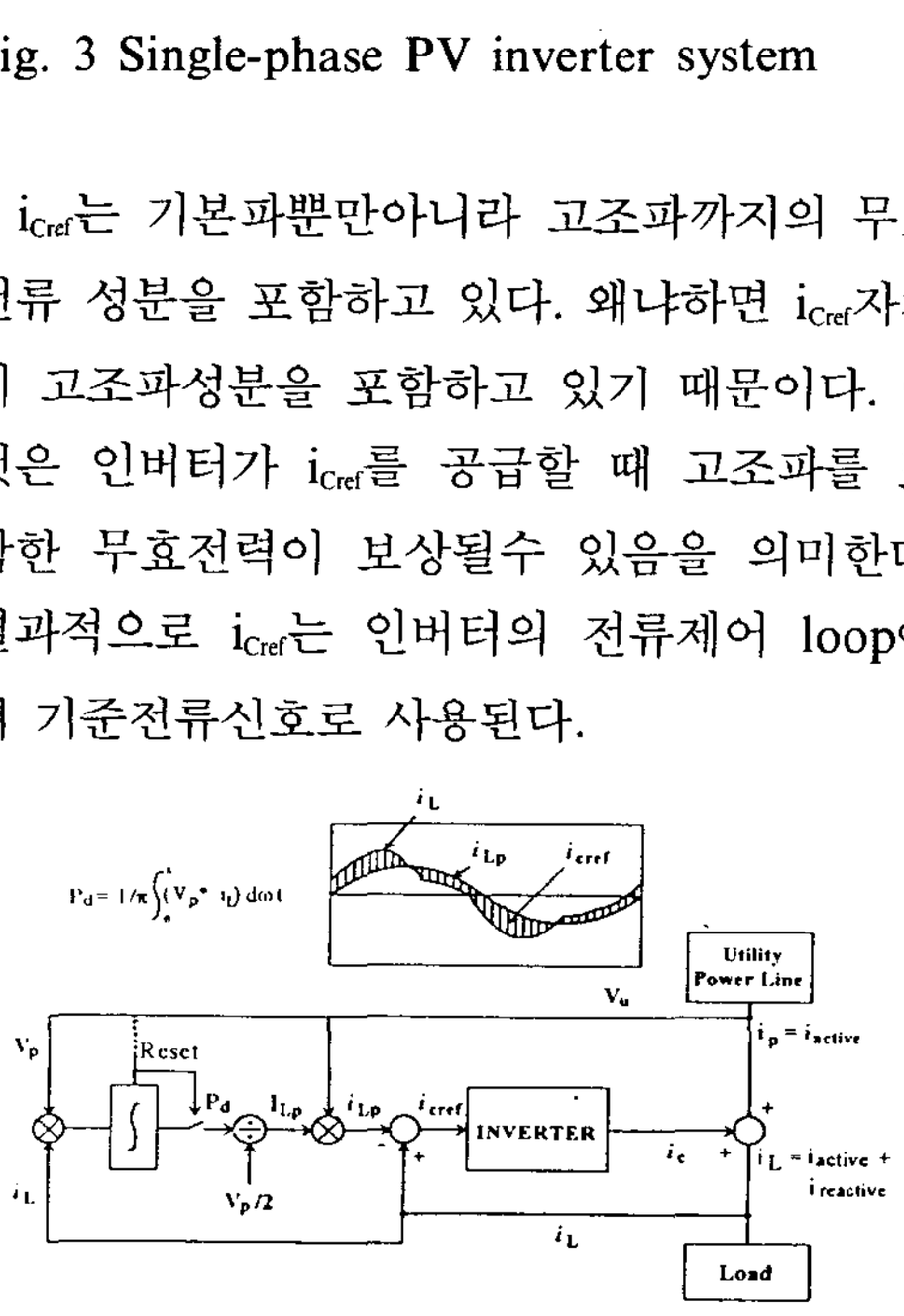


Fig. 4 Block diagram of controller

4. 전류제어기 설계

전압형 계통연계 인버터는 계통과의 동기 및 보호협조 등의 기능을 효과적으로 제어하기 위해 전류제어방식을 채택하는 것이 일반적이다. PWM 인버터의 출력전류제어기법은 PI제어기법, 히스테리시스제어기법, 예측제어기법 등을 들 수 있는데 본 논문에서는 스위칭 주파수가 항상 일정하고 과도응답이 빠른 장점을 갖는 예측제어기법을 이용하여 전류제어기를 구성하였다. 인버터 출력전압을 V_{inv}로 표시하면 인버터 등가회로는 Fig. 5와 같고, 등가회로의 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{inv}=V_u-Ri_a-L\frac{di_a}{dt} \tag{11}$$

위 식을 시간 t의 함수로 표시하면,

$$V_{inv}(t)=V_u(t)-Ri_a(t)-L\frac{di_a(t)}{dt} \tag{12}$$

이다. 그리고 위 미분방정식을 풀면 인버터 출력전류 i_a는 다음과 같은 함수로 나타내어진다.

$$I_a(k+1)=f\{i_a(k),\ v_{inv}(k),\ v_u(k)\} \tag{13}$$

여기에서 인버터 출력전압과 계통전압은 인버터 스위칭 구간 즉, 샘플링 주기 (T)동안에 일정한 값을 가지며, T_k와 T_{k+1}은 각각 스위칭이 결정되어지는 순간을 묘사하며, T_k는 이전 시간을 나타내고, T_{k+1}은 새로운 시간을 나타낸다. 앞에서 유도되어진 i_{cref}를 $i_a(k+1)$로 대치하고, 식(13)을 태양광 인버터 출력전압 v_{inv}으로 표현하면,

$$v_{inv}(k)=g\{i_{cref}(k+1),\ i_a(k),\ v_u(k)\} \tag{14}$$

따라서, 식(14)의 태양광 인버터 출력전압 v_{inv}를 식 (12)에 적용하면

$$V_{inv}(k)=V_u(k)-Ri_a(k)$$

$$-L\frac{[i_{cref}(k+1)-i_a(k)]}{T} \tag{15}$$

이 된다. 여기서 T는 샘플링 주기이다.

따라서 태양광 인버터 출력전압이 식 (15)와 같이 결정되면, 계통연계형 인버터의 출력전류는 I_{cref}를 추종하도록 제어된다.

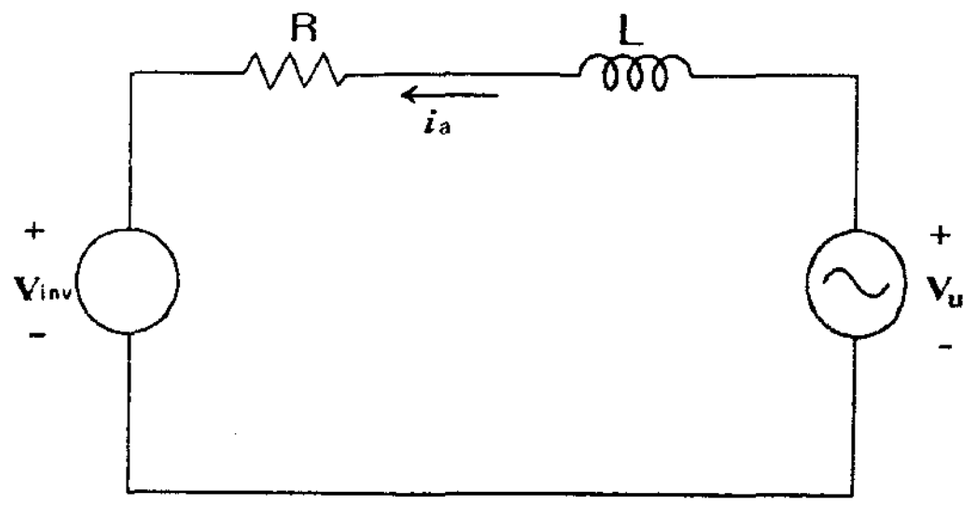


그림 5. Equivalent circuit of grid-connected PV System

5. 시뮬레이션 및 실험결과

고조파를 포함한 무효전력 보상기능을 갖는 단상 계통연계형 태양광 PWM 인버터의 동작특성을 분석하기 위하여 Fig. 3의 시스템 구성에서 무효전력 발생 부하로서 다이오드 전파정류기를 갖는 경우에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 운전 특성을 분석하였다.

시뮬레이션 프로그램으로는 P-SIM을 사용하였고, 시뮬레이션 및 실험대상이 되는 PWM 인버터의 회로 상수는 다음과 같다.

- 스위칭 주파수 f_c=10kHz
- 계통 전원 V_u=60Hz, 141V peak
- DC측 전압 V_c=180V
- 입력 커패시터 C = 10000μF
- 연계 리액터 L_u= 5mH

Fig. 6, 7의 시뮬레이션 및 실험결과를 분석해보면, 고조파가 포함되어 있는 왜형파 형태

의 정류기 입력전류인 부하전류 i_L의 파형은 태양광발전시스템의 보상전류 i_c에 의해 상쇄되어 계통선 전류 i_p의 파형이 정현파에 가깝게 됨을 알 수 있다.

또한 보상된 계통선 전류 i_p의 zero 교차점이 계통선 전압 V_p와 일치하는 것으로부터 계통에서의 기본파 무효전력이 확실히 제어됨을 확인하였다.

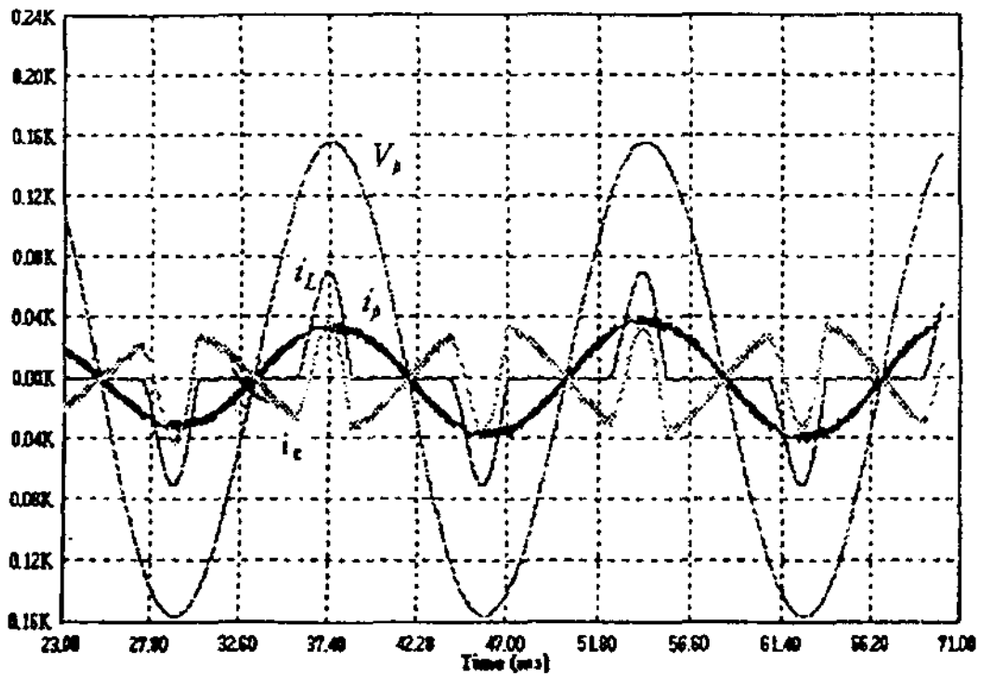
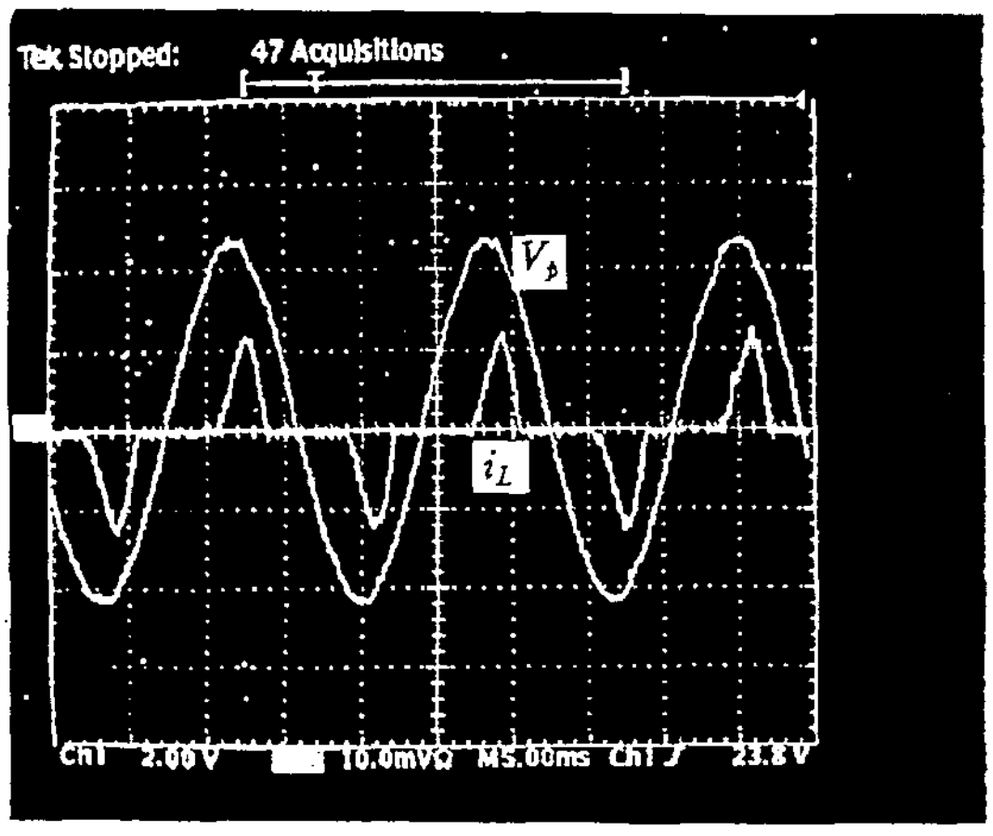
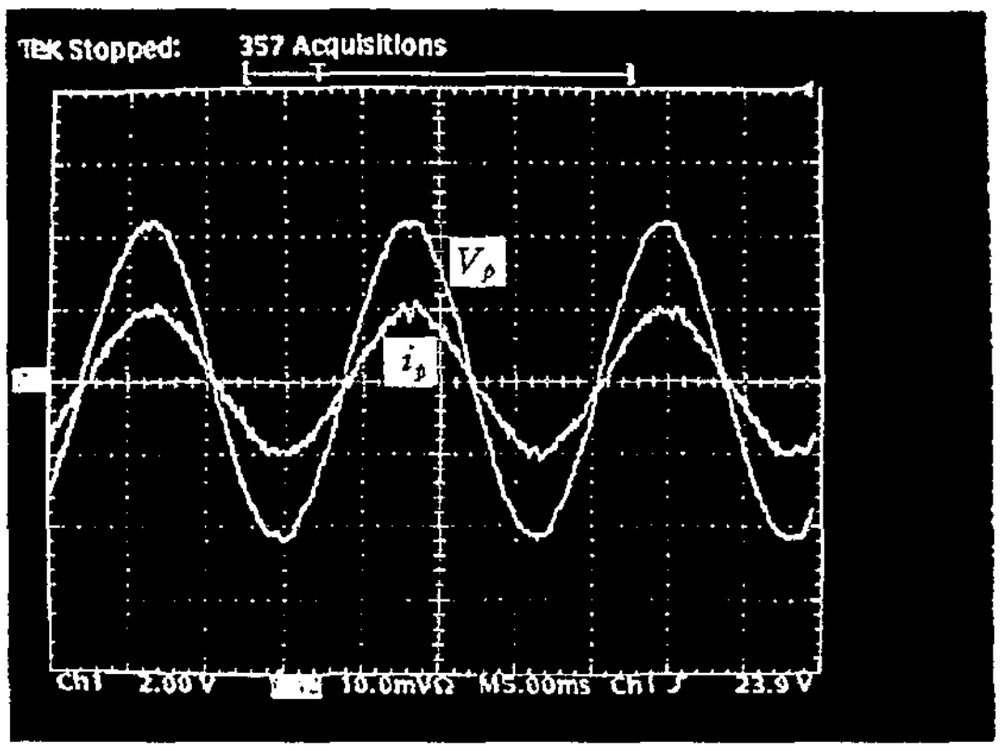


Fig. 6 Simulation waveforms(i_L, i_p, V_p)



(a) Current and Voltage waveforms before reactive power compensation(i_L , V_u)



(b) Current and Voltage waveforms after reactive power compensation(i_p, V_u)

그림 7. Experimental results

5. 결 론

본 논문에서는 고조파를 포함한 무효전력 보상기능을 갖는 태양광발전시스템용 단상 계통연계형 인버터를 제안하였고, 정류기 부하를 갖는 경우에 제안된 시스템에 의해 무효전력 보상이 적절히 이루어짐을 확인하였다.

즉, 태양광발전을 비롯한 분산형 전원형태의 계통연계형 시스템에 적용할 경우 계통으로의 고조파 유입 등 무효전력 발생을 최대한 억제할 수 있음을 확인하였다.

향후 태양광발전시스템의 실용화 보급 확대 측면에서는 인버터 효율 개선, 가격 저감, 그리고 실배전계통 적용시 계통과의 보호 협조 등 계통연계 기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Electric Power Research Institute, AP-3351 : Photovoltaic Power Systems

Research Evaluation : A Report of the EPRI Ad Hoc Photovoltaic Advisory committee, Prepared by Strategies Unlimited, EPRI, Palo Alto, CA, 1983, p. C-5.

[2] Miles, W. T. and Patmore, J., "System Reliability Implications of Distributed Power Sources in the Electric Grid", New Energy Conservation Technologies and Their Commercialization, Vol. 3, 2773-2783, 1981.

[3] B. D. Bedford, and R. G. Hoft, Principles of Inverter Circuits. NewYork : John Wiley & Sons, 1964.

[4] A. Kawamura and R. G. Hoft, "Instantaneous feedback controlled PWM inverter with adaptive hysteresis", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-20, No. 4, pp. 769-775, July/Aug. 1984.

Design and Control of the Single-phase Inverter for Utility Interactive Photovoltaic Generation System

In-Ho Hwang*, Se-Jin Seong**

* *Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)*
** *Chungnam National Univ., Dept. of Electrical Eng.*

Abstract

Recently, new generation systems using solar cells or fuel cells are under development. Particularly, it is expected that small scale, utility interactive, dispersed PV system will be widely diffused in the near future.

The inverter used in coupling the PV array with utility lines is an important factor determining the overall performance of power generation systems.

This paper presents the design and control method of the single-phase PV inverter system that is capable of compensating reactive power including harmonic distortions.

It is shown that reactive power caused by rectifier load can be compensated by the proposed inverter system.