

# 상태공간 모델링을 이용한 계통연계 태양광발전시스템의 설계 및 제어

\*황인호\*, 김시경\*\*, 성세진\*\*\*

\*전력연구원, \*\*공주대, \*\*\*충남대

## Design and Control of Grid-connected Photovoltaic system using the state space Modeling

\*In-Ho Hwang\*, Si-Kyeong Kim\*\*, Se-Jin Seong\*\*\*

\*KEPRI, \*\*Kongju Natl Univ., \*\*\*Chungnam Natl Univ.

### Abstract

It is expected that utility interactive small scale dispersed PV system will be widely diffused in the future.

This paper discussed the design and control method of single phase PV inverter system with compensation capability of reactive power including harmonic distortion, based on state space modelling.

As the results, compensation effects were suggested by simulation and experiment.

특성을 분석하고자 한다.

### 2. 시스템 모델링

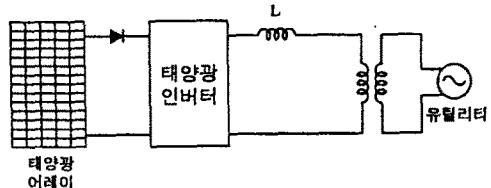


그림 1. 시스템 구성

### 1. 서 론

태양광발전시스템의 응용분야중 향후 가장 많이 실용화 보급 잠재력을 갖고 있는 계통연계형시스템은 주택용, 별당용 또는 기타 계통과 연계되어 있는 분산형 전원 형태의 시스템으로 수kW에서 수MW용량의 계통연계인버터를 필요로 한다.

이러한 상황을 인식하여 선진국등에서는 태양광발전을 비롯한 대체에너지전원의 계통연계관련 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 추정성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압 변화에 대한 운용 능력, 계통 사고 시에 적절히 대응하는 기능 및 자체 발생 고조파로 인한 통신 유도 장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 한다.

유효 전력, 무효 전력을 조절하고 계통선 시스템을 안정화, 효율화하는 기능이 부가될 경우 액티브 필터(Active filter)의 특성과 유사하며, 낮은 THD, 높은 효율, 병렬운전의 관점에서 는 독립형 인버터와 비슷하다. 또한 최대출력 제어를 행하는 점에서는 전력조절기의 특성을 요구함을 알 수 있다.

본 논문에서는 주택용등에 적용이 가능한 단상 계통연계 태양광발전시스템에 있어서 무효전력 보상능력을 갖는 인버터의 제어기법을 제시하고, 상태공간 모델링을 이용한 시스템 운전

일반적으로 단상 계통연계형 태양광 인버터 시스템은 그림 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 하였으며, 계통선로와 인버터 시스템과의 전기적인 결연 및 인버터 사고, 상용 전력계통 이상 발생시에 상호간의 보호를 위하여 삽입한 결연 변압기는 변압기의 누설 인덕턴스  $L_o$ 로 모델링 하였다. 따라서 연계형 인버터 시스템은 리액터  $L_o$ 를 사이에 두고 계통선과 직렬 연계된 모양으로 생각할 수 있다.

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

그림 2의 등가회로로부터 연계형 인버터의 상태공간 모델링을 하기 위하여 먼저 인버터의 교류측의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_U = L \frac{di_a}{dt} + R i_a - (V_{bu} - V_{N0}) \quad (1)$$

(1)식으로부터 스위치  $S_1, S_1'$ 를 스위칭 함수  $d_1, d_1'$ 을 사용하여 다음과 같이 정리할 수 있고,

$$V_U = L \frac{di_a}{dt} + R i_a - (V_d d_1 - V_{bu}) \quad (2)$$

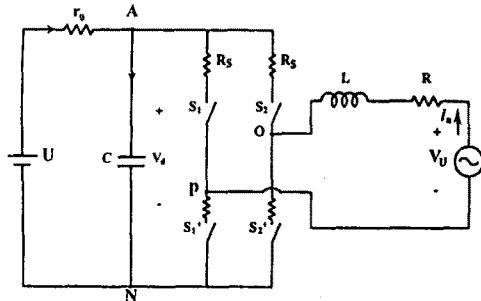


그림 2. 시스템의 동기회로 모델링

유사한 방법으로 스위치  $S_2$ 와  $S_2'$ 에 대한 전압방정식은 스위치 함수  $d_2$ 와  $d_2'$ 를 사용하여

$$V_U = L \frac{di_a}{dt} + R i_a - (V_d d_2 - V_{Np}) \quad (3)$$

으로 표시될 수 있다.

식 (2)는 식 (3)과 동일하므로 다음 관계식이 얻어진다.

$$V_{Np} = V_d(d_1 + d_2) \quad (4)$$

그림 2에 보여진 연계형 인버터의 직류측 노드 A로부터

$$C \frac{dV_d}{dt} = -d_1 \cdot i_o + d_2 \cdot i_o + \frac{U - V_d}{r_0} \quad (5)$$

여기에서  $r_0$  : 태양광 어레이 직렬저항

$U$  : 태양광 어레이 출력전압

식 (3), (4), (5)로 부터 전체시스템의 상태방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$x = [i_a \quad V_d]^T$$

$$Z = \begin{bmatrix} -R & -(d_1 + d_2) \\ d_2 - d_1 & -\frac{1}{r_0} \end{bmatrix}$$

$$e = [V_A \quad U]^T$$

### 3. 제어회로 구성

PWM인버터는 교류출력 전류를 제어해서 DC측과 AC측의 전력흐름, 즉 유효전류성분과 무효전류성분을 제어할 수 있다. 유효전류성분은 AC line전압과 동기인 정현파 전류성분으로 정의된다. 이 경우에는 AC line전압은 계통선 전압을 의미한다. 무효전류성분은 인버터 출력전류로부터 유효전류성분을 뺀 나머지 전류성분으로 정의된다. 즉 유효전류성분은 유효전력을 전달하고, 무효전류성분은 무효전력을 전달한다.

따라서 유효전류성분은 태양전지로 부터 계통선으로 전력흐름을 최대화하기 위해 제어되고, 무효전류성분은 계통선에서 무효전력과 고조파를 보상하기 위해 제어될 수 있다.

시스템에 연결되어 있는 부하전류  $i_L$ 은 다음과 같이 두성분으로 나뉘어진다.

$$i_L = i_{active} + i_{reactive} \quad (7)$$

여기서 유효전류성분  $i_{active}$ 는 계통선 전압과 동기인 정현파 전류로 정의된다. 그리고 무효전류 성분  $i_{reactive}$ 는  $i_L$ 로부터  $i_{active}$ 를 뺀 나머지 전류성분으로 정의된다. 만일 인버터가 똑같은 전류(즉  $i_C = i_{reactive}$ )를 공급할 수 있다면, 계통선 전류  $i_P$ 는 다음과 같이 된다.

$$i_P = i_L - i_C$$

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

이 관계식은  $i_P$ 가 단지 무효전류성분이 없이 유효전류 성분만 포함하고 있음을 나타낸다. 다른 말로 표현하면 무효전력이 계통선에서 보상됨을 의미한다. 그림 3은 역률보상이 가능한한 시스템 구성을 보여주며, 보상전류 합성을 위한 첫번째 단계로 부하전류내의 유효전류성분의 크기,  $i_{LP}$ 는 다음식에 의해 계산된다.

$$I_{LP} = \frac{2}{\pi V_p} \int_0^{\pi} (V_p' I_L) dt \quad (9)$$

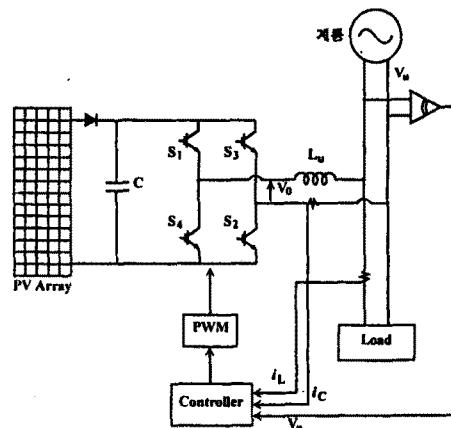


그림 3. 역률보상이 가능한 태양광인버터시스템

여기서  $V_p'$ 는 계통선 전압과 같은 위상, 크기의 신호이고,  $V_p$ 는 그 크기이며,  $i_L$ 은 순시 부하전류이다.  $I_{LP}$  와  $V_p'$ 의 곱에 의해 얻어진 신호  $i_{LP}$ 는  $i_{active}$ 와 똑같다. 마지막으로  $i_L$ 로부터  $i_{LP}$ 를 빼서 얻어진 전류신호는  $i_{Cre}$ 로 불린다. 이 합성 과정으로부터  $i_{Cre}$ 는 분명히 보상되어야 할  $i_{reactive}$ 와 똑같은 전류신호이다.  $i_{Cre}$ 는 기본파뿐만 아니라 고조파까지의 무효전류성분을 포함하고 있다. 왜냐하면  $i_{Cre}$  자체에 고조파성분을 포함하고 있기 때문이다. 이것은 인버터가  $i_{Cre}$ 를 공급할 때 고조파를 포함한 무효전력을 보상될 수 있음을 의미한다. 결과적으로  $i_{Cre}$ 는 인버터의 전류제어 loop에서 기준전류신호로 사용된다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

고조파를 포함한 무효전력 보상기능을 갖는 단상 계통연계형

태양광 PWM 인버터의 동작특성을 분석하기 위하여 그림 3의 시스템 구성에서 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.

- 소위칭 주파수  $f_c = 10\text{kHz}$
- 계통 전원  $V_u = 60\text{Hz}, 141\text{V peak}$
- DC축 전압  $V_c = 180\text{V}$
- 입력 커패시터  $C = 10000\mu\text{F}$
- 연계 리액터  $L_u = 5\text{ mH}$

그림 4, 5의 시뮬레이션 및 실험결과에서 알 수 있듯이 부하 전류  $i_L$ 의 파형은 왜곡되어 있지만 전원전류  $i_p$ 의 파형은 정현파이다.

또한  $i_p$ 의 zero 교차점이  $V_u$ 와 일치하기 때문에 계통에서의 무효전력은 거의 0에 가까움을 알 수 있다.

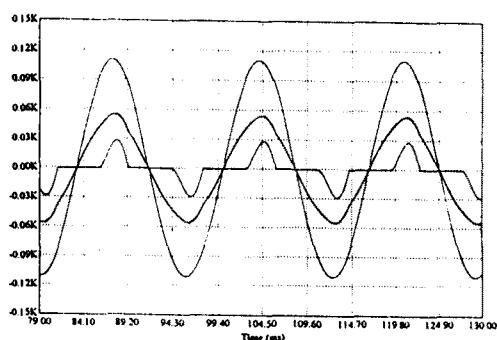
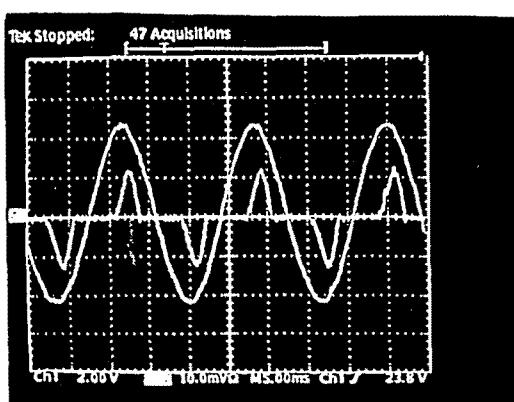
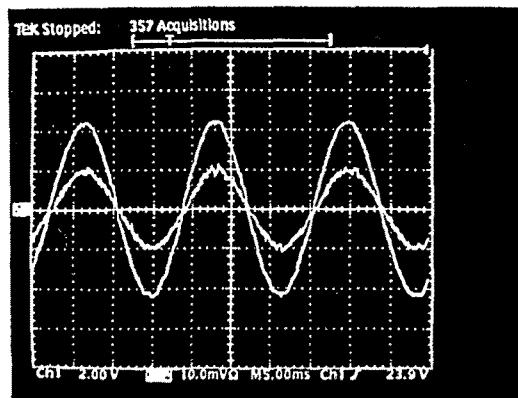


그림 4. 시뮬레이션 결과( $i_L, i_p, V_p$ )



(a) 보상전 전류 파형( $i_L, V_u$ )



(b) 보상후 전원전류 및 전압 파형( $V_u, i_p$ )

그림 5. 실험결과 파형

## 5. 결 론

본 논문에서는 고조파를 포함한 무효전력 보상기능을 갖는 연계형 태양광발전시스템용 인버터를 제안하여, 단상 인버터를 갖는 계통 연계 태양광발전시스템에 대한 인버터 소위칭 함수를 도입하여 상태공간 모델링을 유도하였고, 정류기 부하를 갖는 시스템의 경우에 무효전력 보상이 적절히 이루어짐을 확인하였다.

즉, 주택용 등의 태양광발전시스템에 본 방식을 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 설비전계통 적용시 계통과의 보호 협조 등 계통연계 기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [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*. New York : 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.