

# 계통연계 태양광발전시스템의 제어기법 및 연계운전특성

안교상\*, 임희천\*, 황인호\*\*, 주형준\*\*

\*한전전력연구원, \*\*옥천대학 전기과

## A control method and test results of utility interactive photovoltaic power generation systems

K. S Ahn\*, H. C. Lim\*, I. H. Hwang\*\*, H. J. Joo\*\*

\*KEPRI, \*\*Okchon College

### Abstract

This paper describes a design method of grid-connected photovoltaic power generation systems with three phase inverter. A 3-phase 50 kW photovoltaic power generation system including a DC/AC inverter is designed and made in order to investigate the system performance for grid connection.

Also the control scheme of a three phase current-controlled PWM inverter is presented by using d-q transformation. The experimental waveforms show that the proposed system has stable behavior with an unit power factor in utility-interactive operation.

### 1. 서론

최근 신에너지원으로 주목받고 있는 태양광발전 (photovoltaic power generation)은 대체에너지 기술중에서 가장 실용화에 가깝고 운전이 쉬우며, 유지 및 보수가 간단하고 발전규모 선택이 자유롭다는 여러 가지 장점을 가지고 있어 미래의 자원고갈에 대처할 수 있는 유력한 대체에너지원으로 각광을 받고 있을 뿐 아니라 최근 문제되고 있는 환경문제 해결에도 부합할 수 있는 특징을 갖고 있다. 특히 계통연계 태양광발전시스템은 최대전력을 발전하는 시간대가 하절기 피크 전력 소비시간대와 비슷하여 주택 및 건물의 지붕이나 옥상, 벽면 등에 설치함으로써 전력 수급 불균형 해소에 기여할 수 있고 국토의 효율적 사용이 가능한 전력공급원으로 그 활용이 가능하다.[1]

계통연계형은 태양전지의 출력이 부하의 수요에 비해 부족할 경우는 부족분을 전력계통으로부터 수전하고, 잉여출력이 있는 경우에는 잉여분을 계통측에 공급하는 것이다. 일반 주택용 또는 공공건물용 계통연계형 태양광발전시스템에서는 기본적으로 태양전지 어레이 및 인버터 등으로 구성되지만 보수 점검 및 경제성의 관점에서 축전지를 사용하는 회로는 바람직하지 않다.

본 논문에서는 3상계통연계 태양광발전시스템의 인버터 제어기법으로 d-q 좌표변환에 의한 전류제어기 구성기법을 기술하고 50 kW 규모의 실증시스템 제작을 통한 운전시험 결과를 제시하고자 한다.

### 2. 계통연계 태양광발전시스템의 구성

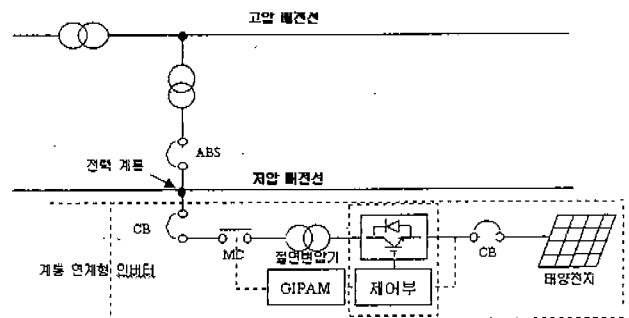


그림 1. 연계형 태양광 발전시스템의 구성 블록도

계통연계형 시스템 구성은 독립형보다는 비교적 간단한 형태로 그림 1.에 보이는 것처럼 태양전지 어레이

이, 직·교류 전력변환시스템(인버터) 및 연계장치로 이루어진다. 특히 중요한 구성요소인 태양전지를 전원으로 하는 계통연계형 직·교류 전력변환시스템은 상용 전력계통과 병렬 접속하기 때문에 배전선의 상태 변화에 대한 추정성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압 변화에 대한 운용 능력, 계통 사고시에 적절히 대응하는 기능 및 자체 발생 고조파로 인한 통신유도 장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 하며 그 외에도 일반적으로 다음과 같은 기능을 갖도록 요구되고 있다.

- ① 태양전지 출력전압 변동에도 안정된 전압, 주파수의 출력을 유지해야 한다.
- ② 계통의 전력품질을 고려하여 출력의 고조파 함유량이 작아야 한다.
- ③ 역률 1의 무효전력의 제어가 가능해야 한다.
- ④ 직·교류전력변환효율이 높아야 한다.
- ⑤ 태양전지 어레이로부터 최대출력제어가 가능해야 한다.
- ⑥ 계통과의 병렬 운전이 가능해야 한다.

위에서 제시한 요구조건에서 알 수 있듯이 계통연계형 시스템도 낮은 왜율, 높은 효율을 필요로 하는 점에서 독립형과 마찬가지로, 기본적으로 상용 전력계통과 연계되기 때문에 계통과 병렬운전 될 수 있는 기능 이외에 기존 전력계통의 전력품질 및 안정성을 저해하지 않는 특성을 갖추어야 한다.

### 3. 시스템의 제어기법

전체시스템의 제어는 주로 연계인버터에 의해 행해지며 인버터 제어방식은 출력파형의 왜율저감을 위해 PWM 방식으로 구성되며 전력계통과의 보호협조 측면에서 전류제어형이 유리한 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서도 이점을 고려하여 PWM 전류제어방식을 채택하였고, 연계 인버터 및 제어기 구성은 그림 2.와 같다. 즉 전력용 소자인 IGBT로 구성되어 있는 전력회로부, 태양전지 출력 안정화를 위한 DC 링크 콘덴서, 출력파형의 개선을 위한 LC 필터, 전원 전압과의 위상을 동기시키기 위한 전원 위상 검출부, d-q 변환에 의한 출력전류 제어를 위한 전류제어기, 2상/3상 및 정지/회전 좌표변환기, 그리고 전력소자를 구동하기 위한 게이트 구동회로로 구성되어 있다.

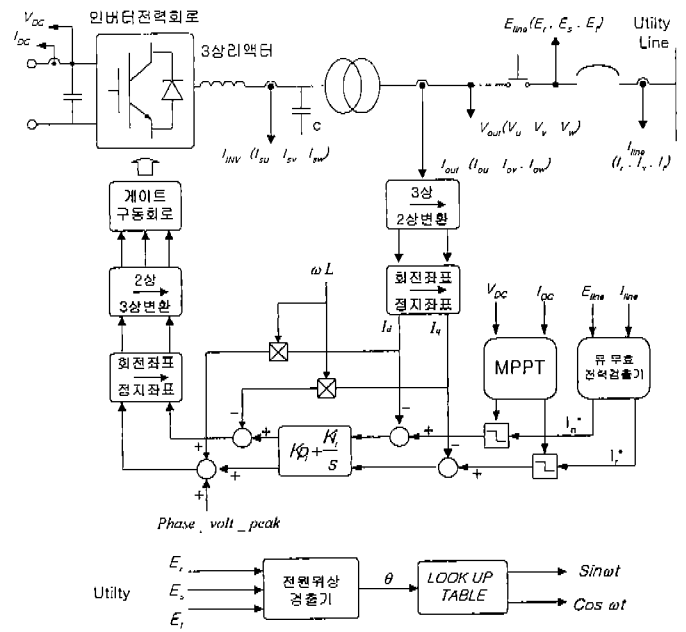


그림 2. 시스템 제어 블록도

#### 3-1 3상 인버터의 d-q 제어이론

3상 인버터의 출력제어를 위해 동기 d-q축 변환 행렬을 사용한다. 일반적으로 3상 인버터의 동특성을 이해하고 해석하는데는 d-q 좌표계에서의 모델링이 필요하다. 3상 인버터를 a, b, c 좌표계에서 모델링하면 인버터에 접속되는 인덕턴스 전류, 전압 등이 시간에 따라 교류적으로 변하므로 동특성 해석 및 제어기 설계가 매우 어렵다. 따라서 본 장치에서는 d-q 좌표계에서 모델링을 하여 구성하였으며 이 모델링의 장점은 다음과 같다.

- ① 시간 또는 주파수에 따라 변화하는 파라미터가 상수가 된다.
- ② 3상이 평형인 경우 영상분을 제거 할 수 있어 시스템의 차수를 줄 일 수 있다.
- ③ 동기 좌표계로 dq 축을 선정하면 전압, 전류 등의 전기적 신호가 교류 값에서 직류 값으로 변환되어 제어기 설계가 용이하다.

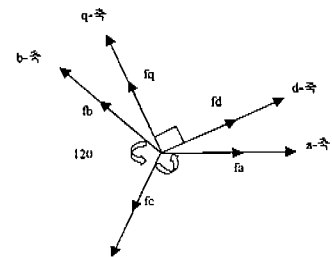


그림 3. abc축과 dq축간의 변환

그림 3은 abc축과 dq축간의 관계를 나타낸다.  $f_a, f_b, f_c$ 는 상간에  $120^\circ$ 씩 위상차가 나는 abc축에 정지되어 시간에 따라 크기가 상하로 변하는 변수로 전압, 전류 및 자속 등의 상(phase)변수를 나타낸다.

$f_d, f_q$ 는 정지된 또는 임의의 속도  $\omega$ 로 회전하는 dq 축상의 변수이다. 만일 abc상이 balance되어 있다면 abc 좌표계와 dq 좌표간의 변수 변환은 다음식에 의해 구해진다.

$$f_{dq} = K_{abc}^{dq} \cdot f_{abc} \quad (3.1)$$

여기서,

$$f_{dq} = [f_d \ f_q]^T, \quad f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$$

$$K_{abc}^{dq} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0),$$

여기서  $\omega$ 는 dq축의 회전 각속도이다.

dq축의 회전각  $\theta$ 의 초기치는 d축이 a상에 일치되어 있다는 가정하에 일반적으로 영으로 한다. dq 좌표계는 고정 dq 좌표계(stationary dq frame)와 동기 dq좌표계(synchronous dq frame)가 주로 사용된다.

동기 dq좌표계에서는 dq축을 동기속도  $\omega_e$ 로 회전시켜 실제 교류의 전기 신호가 직류로 변환된다. 식 (3.1)에서 dq축 회전속도를 영으로 하면 abc 3상 변수를 dq 변수로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$f_{dq}^s = K_{abc}^{dqs} \cdot f_{abc} \quad (3.3)$$

여기서,

$$K_{abc}^{dqs} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

그리고 역 변환식은 다음과 같다.

$$K_{dqs}^{abc} = \frac{3}{2} K_{abc}^{dqs}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

또한 고정 dq 변수를 동기 dq 변수의 변환은 다음식에 의해 구한다.

$$f_{dq}^e = K_s^e \cdot f_{dq}^s \quad (3.6)$$

$$K_s^e = \begin{pmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

여기서,  $\theta_e(t) = \int_0^t \omega_e d\tau$ ,  $\omega_e$ 는 동기속도를 나타낸다. 동기 dq 변수를 고정 dq 변수로의 변환은 다음과 같다.

$$K_s^e = K_s^{eT} \quad (3.8)$$

한편 abc 변수와 dq 변수의 변환은 3상 전원의 상(phase)변수를 기준으로 이루어진다. 따라서, 제어기 구성시에 전류나 전압을 인버터의 출력단에서 검출하기 때문에 abc/dq 변환시 변압기의 Y- $\Delta$ 결선을 변환식에 고려하여야 한다

### 3-2 전류제어 알고리즘

인버터 출력전류를 검출하여 3상/2상 변환하고 다시 동기좌표로 변환한다.

$$\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_r \\ i_t \\ i_s \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{pmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_r \\ i_t \\ i_s \end{pmatrix}$$

위식에서 각각의 전류값은 동기 좌표계에서 출력전류의 d축 전류와 q축전류를 나타낸다.

$$I_{qerr} = I_{qerrf} - I_{qe} \quad (3-10)$$

$$I_{derr} = I_{dref} - I_{de}$$

$$I_{qo} = I_{qerr} \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \quad (3-11)$$

$$I_{do} = I_{derr} \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)$$

위의 식에서  $\omega L$  항을 추가하여 인덕터에 의한 간섭성분으로 비간섭 제어를 행하도록 한다.  $V_m$ 은 인버터의 전압과 계통전압의 크기를 같게 하기 위해 추가된다.

$$I_{qce} = I_{qo} + I_{de} \cdot \omega L = I_{qerr} \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) + I_{de} \cdot \omega L + V_m$$

$$I_{dce} = I_{do} + I_{qe} \cdot \omega L = I_{derr} \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) - I_{qe} \cdot \omega L$$

위의 결과식은 인버터를 제어하기 위한 전류 명령치로서 동기 좌표를 정지좌표로 변환한 후 다시 2상/3상 변환하고 최종적으로 출력변압기의 결선을 고려하면 인버터 전류제어를 위한 결과식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} I_{cds} \\ I_{cqs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dce} \\ I_{qce} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\sqrt{3}/2 & -1/2 \\ -\sqrt{3}/2 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cds} \\ I_{cqs} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$\begin{bmatrix} I_{acmd} \\ I_{bcmd} \\ I_{ccmd} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

#### 4. 실증시스템 제작 및 시험운전결과

##### 4-1. 실증시스템 제작

실증설비로 제작 설치한 50 kW 계통연계 태양광발전시스템은 태양광을 받아 직류전기를 발생시키는

53 Wp용량의 PV 모듈 총 960매가 20매씩 3병렬을 1 어레이군으로 모두 16개의 태양전지 어레이로 이루어져 있다. 독립된 16개의 어레이군에는 각각의 출력단에 역전류 방지 다이오드, 차단 스위치 등으로 구성된 분전함의 설치되어 있고 이를 통하여 제어실내의 50kW 3상 인버터에 연결된다.

인버터를 통해 교류로 변환된 태양광발전시스템의 출력전력은 전력연구원내에 있는 수변전설비의 분전반에 연결되어 원내의 부하설비에 공급하도록 구성되어 있다. 50kW PV 실증시스템 설치전경을 그림4에 보인다.

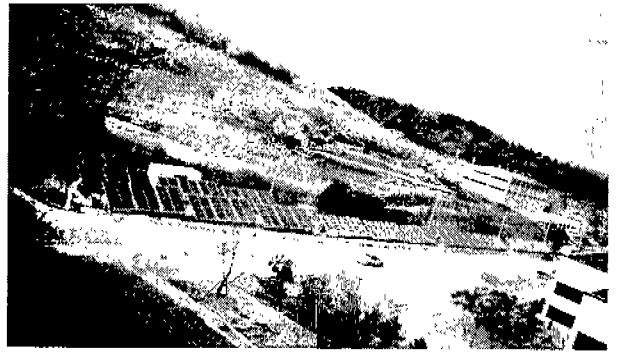


그림 4. 50kW PV 실증시스템

##### 4-2 시험운전결과

실험을 위해 제작한 3상 IGBT PWM 인버터는 DSP320C31 보드를 사용하였으며 입력전압은 DC 280~400V, 스위칭 주파수는 10 kHz, 3상 인덕터 및 캐패시터는 각각 1[mH], 25[μF]으로 하였다. 출력단은 전압비가 AC168:380V인 절연변압기를 통하여 전원계통에 연결된다.

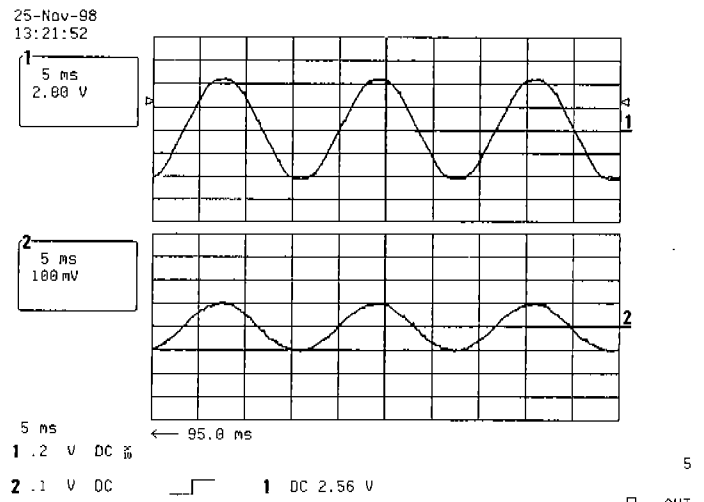


그림 5. 인버터 출력전압, 전류파형

[ CH1 : INVERTER R 전압 (146V/div), CH2 : INV R 전류(20A/div) ]

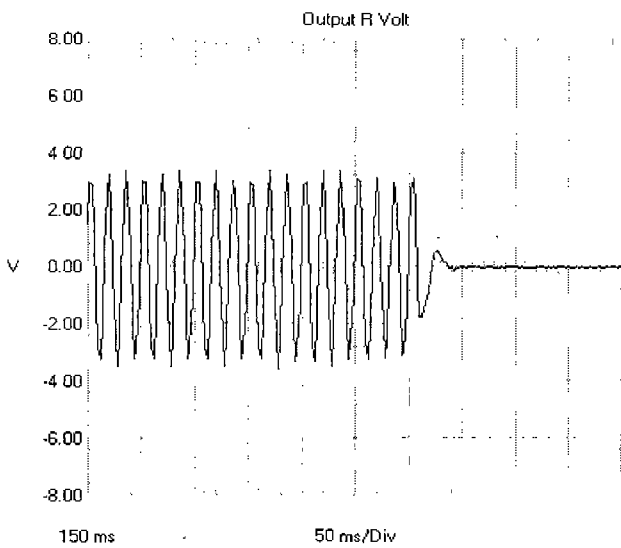


그림 6. 전원계통정전시 인버터 동작상태

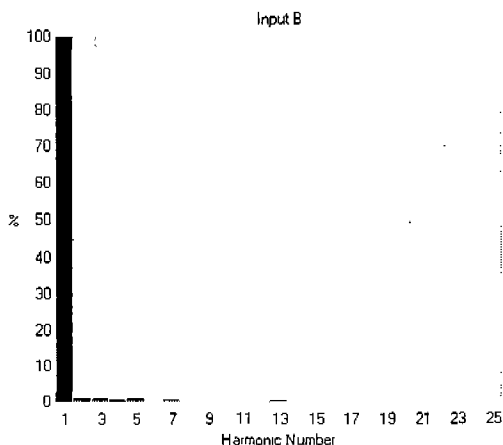
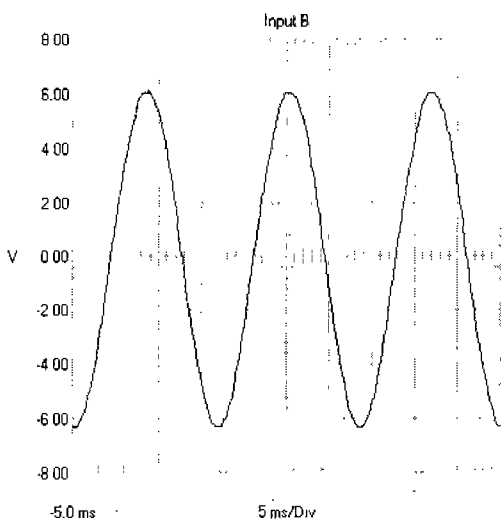


그림 7. 100% 부하시 출력전류파형 및 THD

그림4는 시스템 출력전압 전류파형을 보여주는 것으로 전원전압과 출력전류가 위상이 일치되어 단위역

율로 제어되고 있음을 보여준다. 그림5는 계통정전시 인버터 응답특성을 보이는 것으로 계통연계 PV 시스템에 의한 역충전은 계통의 안전상 중요한 사안이다. 본 실험에서는 선로 임피던스 및 모의 저항부하를 가정하여 실험하였으며 발전량<부하량, 발전량=부하량, 발전량>부하량일때 각각 전원 차단과 동시에 정지함을 확인하였다. 그림6은 10% 부하시 출력전류 파형의 THD 분석결과로서 전원계통의 전력품질에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

3상 계통연계 태양광발전시스템의 제어기법으로 d-q 좌표변환에 의한 전류제어기법을 제시하고 50 kW 실증시스템 제작 설치에 의한 시험운전 결과를 검토하였다.

시험운전결과 분석을 통하여 d-q 변환에 의한 제어기법을 채택한 3상 계통연계 태양광발전시스템이 안정한 연계운전특성을 보임을 확인하였다. 단위역율 제어, 출력전류의 고조파 분석, 저항부하시 전원 차단에 따른 인버터 동작 정지 등의 시험에서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 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.
- [2] W. T. Miles and J. Patmore, "System Reliability Implications of Distributed Power Sources in the Electric Grid," New Energy Conservation Technologies and Their Commercialization, Vol. 3, 2773-2783, 1981.
- [3] Dugan, R. C., Jewell, W. T. and Roesler, D. J., "Harmonics and Reactive Power from Line-commutated Inverters in Proposed Photovoltaic Subdivision", : IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 102-9, 3205-3211, 1983.
- [4] T. Jewell, T. Rizy, "Interconnection problems Associated with Small Dispersed Electric Generators and Inverter Devices", ISA Trans., Vol. 23, No. 2, 1984.