

# 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 실계통 적용을 위한 시뮬레이션 모델에 관한 연구

(A Study on the Simulation Model of PV Generation System for its Application  
to Real Power System)

이계병\* · 손광명\*\* · 전인수

(Kye-Byung Lee · Kwang-Myung Son · In-Soo Jeon)

## 요 약

본 논문에서는 태양광 발전시스템을 전력회사의 실배전 계통에 적용하기 위한 시뮬레이션 모델링을 제시한다. 태양광 발전시스템이 실배전 계통에 미치는 영향을 해석하기 위하여, 태양광 발전시스템과 이를 실배전 계통에 적용한 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 태양광 발전 시스템의 적용 후 변전소로부터의 전력공급을 감소시킴으로써 부하 말단전압이 개선됨을 보였다. 또한 부하모선의 전압을 보상함으로써 부하 측의 전력품질이 개선됨을 보였다.

## Abstract

This paper deals with the simulation modeling of PV generation system for its application to utility distribution network. PSCAD/EMTDC simulation model is developed for use in studying the effect of the PV generation to the distribution system. Simulation results show that the addition of the PV system improves the voltage profile of the area by decreasing the power flow from the utility substation. Case studies also show that power quality at the load side is also improved via voltage compensation at the load bus.

Key Words : Utility Interface, Photovoltaic Generation System, Real Power System, PSCAD/EMTDC

## 1. 서 론

최근 유가 급등과 환경 문제에 대처하기 위해

신·재생에너지를 이용한 마이크로전원 또는 소규모 분산 에너지원들의 계통 도입이 활발해지고 있다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 마이크로 전원으로 이용한다. 태양광 전지의 출력은 온도와 일사량에 의해 결정되고, 그림자 효과와 같은 갑작스런 일사량 변화가 태양광 발전 시스템의 출력에 영향을 미치게 되어 계통으로 영향을 미칠 수 있다. 따라서 태양광 발전 시스템이 실제 계통과 연계되어 운전될 때 계통안정성과 전력품질 향상에 대해서 먼

\* 주저자 : 고려대학교 전자전기공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 동의대학교 전기공학과 교수

Tel : 051-890-1671, Fax : 051-890-1664

E-mail : kmson@deu.ac.kr

접수일자 : 2008년 3월 27일

1차심사 : 2008년 4월 2일

심사완료 : 2008년 5월 2일

저 해석되고 연구되어야 한다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 실계통에 적용하였을 때 전력품질 및 전압안정도에 미치는 영향을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모델에 관하여 연구하였다. 본 논문의 태양광 발전 시스템의 인버터는 발전용량이 2[MW]인 삼랑진 태양광 발전소에서 운전되고 있는 인버터(유효전력 250[kW], 독일 SMA사) 시스템을 기준으로 하고 인버터 제어는 비간섭 전류제어[1-2]로 하였다.

태양광 발전 시스템이 적용된 곳은 경상남도 양산시 양산변전소로부터 전력을 공급받는 통도사지역이다. 특히 양산지역 계통에서 통도사 지역은 변전소와 거리가 다른 지역에 비해 10배 이상 떨어져 있어서 부하 말단의 변압기 측 전압 강하가 매우 심각하다. 이를 해결하기 위해 현재는 부하 말단 측 변압기의 탭을 조정하여 전압강하분을 보상하고 있다. 이는 선로 손실의 심각함을 의미하고, 이 지역의 부하 증가에 대한 전압안정도 문제 등을 야기할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 부하 말단 전압이 많이 강하되는 배전선로에 적용하여 그 효과를 검토하였다.

PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 태양광 발전 시스템 및 양산지역 계통을 모델링하였다. 양산지역 계통의 부하들은 변전소에서 측정된 값을 기준으로 특정 부하 조건으로 하였다. 태양광 전지의 일사량 및 온도는 여름과 겨울을 상정하여 설정하였고, 현실 가능한 변화를 주어 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과로부터 전력 공급 환경이 좋지 못한 지역에 태양광 발전 시스템을 적용함으로써 배전선로 말단 전압 향상 등의 효율성을 확인할 수 있었다.

## 2. 태양광 발전 시스템

### 2.1 태양광 전지 모델

태양광 전지의 등가회로는 병렬저항이 포함된 등가회로와 입사광의 세기가 큰 경우 병렬저항을 무시하는 간략화된 등가회로로 구분된다[3]. 그림 1은 간략화된 태양광 전지 모듈의 등가회로를 나타낸 것이다[3-4].

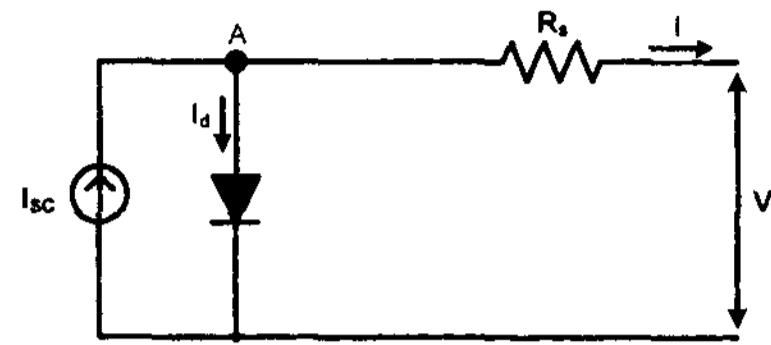


그림 1. 태양광 전지 모듈의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of PV module

그림 1의 등가회로에서 식 (1)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

여기서  $I_{sc}$ 는 모듈의 단락전류,  $I_0$ 는 다이오드의 포화전류,  $V$ ,  $I$ 는 각각 모듈의 단자전압과 전류,  $R_s$ 는 모듈의 직렬저항,  $n$ 은 다이오드 이상 정수(1~2),  $V_T$ 는 열 전위차(단,  $V_T = (kT/q)m$ ),  $k$ 는 볼츠만 상수( $1.38e^{-23}$  [J/K]),  $T$ 는 절대온도,  $q$ 는 쿨롬 상수( $1.6 \times 10^{-19}$  [C])이다.

식 (1)에서 태양광 전지의 단락전류  $I_{sc}$ 는 식 (2)와 같다.

$$I_{sc} = I_{sc0} (S/1000) + J(T - T_{ref}) \quad (2)$$

여기서  $T_{ref}$ 는 기준온도(=298[K]),  $I_{sc0}$ 는 기준온도에서의 단락전류,  $S$ 는 일사량,  $J$ 는 단락전류 온도계수이다.

식 (1)에서 다이오드 포화전류는 식 (3)과 같다.

$$I_0 = I_{sc} \{ 1 / [ \exp(V_{oc}/nV_T) - 1 ] \} \quad (3)$$

여기서  $V_{oc}$ 는 모듈의 개방전압이다.

그림 1의 태양광 전지 모듈을 직렬 및 병렬로 구성된 태양광 전지 어레이의 관계식은 식 (4)와 같이 된다.

$$I_A = I_{SCA} - N_P I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_A + I_A R_{SA}}{nN_S V_T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

여기서  $I_{SCA}$ 는 태양광 전지 어레이의 단락전류,  $I_A$ 는 어레이의 전류,  $N_p$ ,  $N_s$ 는 각각 태양광 전지의 어레이를 구성하는 모듈의 병렬 및 직렬연결 수,  $R_{SA}$ 는 어레이의 직렬저항이다.

### 2.2 MPPT 알고리즘

태양광 발전 시스템은 일사량과 온도 변화에 따라 특성이 달라져서 특정 기상조건에서 최대 전력을 출력하기 위해 최대 출력점 제어(MPPT, Maximum Power Point Tracking) 알고리즘을 이용한다.

본 논문의 태양광 발전 시스템은 MPPT 알고리즘으로 증분 컨덕턴스 법[5]을 이용하고, 그 관계식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = G + dG \quad (5)$$

여기서  $G = I/V$ ,  $dG = dI/dV$ 이고,  $I$ ,  $V$ 는 각각 태양광 전지 어레이의 출력 전류 및 단자 전압이다.

### 2.3 인버터의 제어 시스템

#### 2.3.1 계통 연계형 전압원 인버터 모델링

그림 2는 3상 계통 연계형 전압원 인버터의 등가 회로를 나타낸 것이다.

그림 2에서 인버터 출력 상전압의 전압방정식은 식 (6)~(8)과 같다.

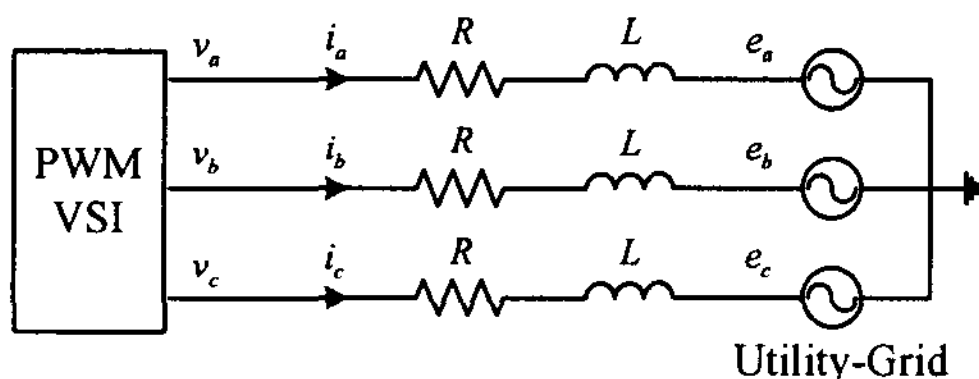


그림 2. 3상 계통 연계형 전압원 인버터 시스템의 3상 등가회로

Fig. 2. Three phase equivalent circuit of grid-connected voltage source inverter system

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (6)$$

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (7)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (8)$$

식 (6)~(8)을  $v^r = v_d^r + jv_q^r$ 의 회전형 좌표로 변환하면 식 (9), (10)과 같다.

$$v_d^r = Ri_d^r + L \frac{di_d^r}{dt} - \omega_e Li_q^r + e_d^r \quad (9)$$

$$v_q^r = Ri_q^r + L \frac{di_q^r}{dt} + \omega_e Li_d^r + e_q^r \quad (10)$$

식 (9), (10)을 라플라스 변환하고, 출력을  $i_d$ ,  $i_q$ 로 하여 전달함수로 나타내면 식 (11), (12)와 같다.

$$i_d^r / (v_d^r + \omega_e Li_q^r - e_d^r) = 1 / (Ls + R) \quad (11)$$

$$i_q^r / (v_q^r - \omega_e Li_d^r - e_q^r) = 1 / (Ls + R) \quad (12)$$

#### 2.3.2 인버터의 전류제어

식 (11), (12)의 3상 계통 연계형 전압원 인버터의 모델로부터 인버터의 전류제어는 PI 제어기를 이용하여 각 인버터의 d, q축 전류를 제어한다.  $i_d^r$ 를 제어하기 위해  $v_d^r$ 를 제어,  $i_q^r$ 를 제어하기 위해  $v_q^r$ 를 제어하면 된다[1-2].

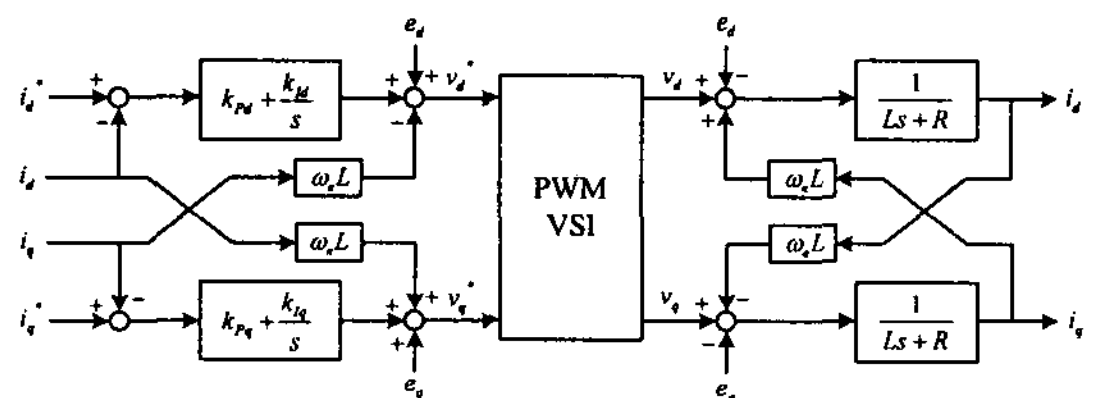


그림 3. 계통 연계형 전류 제어 전압원 인버터의 블록 다이어그램

Fig. 3. Block diagram of grid-connected current-control voltage source inverter

식 (11), (12)의 모델을 고려하였을 때, d-q축 비간섭 제어를 위해서는 전류제어기 출력에 식 (13), (14)와 같은 피드포워드(feedforward) 성분이 필요하다 [1-2].

$$v_{d-ff}^r = -\omega_e L i_q^r + e_d^r \quad (13)$$

$$v_{q-ff}^r = \omega_e L i_d^r + e_q^r \quad (14)$$

그림 3은 식 (11), (12)의 모델과 식 (13), (14)를 포함한 계통 연계형 전압원 인버터의 비간섭전류 전류제어기의 전체 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

그림 3의 블록 다이어그램의 전달함수는 식 (15), (16)과 같다.

$$\frac{i_d}{i_d^*} = \frac{(k_{Pd}/L)s + k_{Id}/L}{s^2 + (R/L + k_{Pd}/L)s + k_{Id}/L} \quad (15)$$

$$\frac{i_q}{i_q^*} = \frac{(k_{Pq}/L)s + k_{Iq}/L}{s^2 + (R/L + k_{Pq}/L)s + k_{Iq}/L} \quad (16)$$

여기서  $k_{Pd}$ ,  $k_{Id}$ ,  $k_{Pq}$ ,  $k_{Iq}$ 는 각각 d 축 및 q 축 전류제어기의 PI-제어기 이득이다.

### 2.3.3 DC 링크 전압제어

그림 4는 태양광 전지 어레이와 전압원 인버터 사이 DC 링크(DC-link)에서의 전력 흐름을 나타낸 것이다.

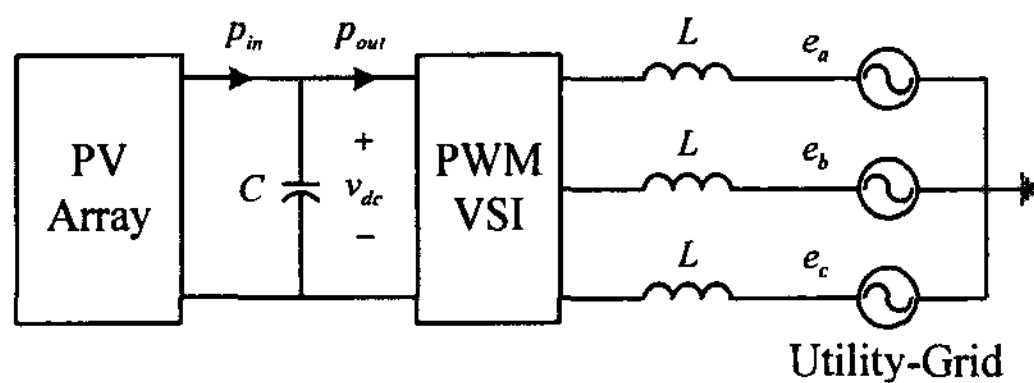


그림 4. DC 링크에서의 전력흐름  
Fig. 4. Power flow at the DC-link

그림 4의 DC 링크에서 순시 전력 평형 방정식은 식 (17)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C v_{dc}^2 \right) = p_{in} - p_{out} \quad (17)$$

식 (17)에서  $p_{out}$ 은 전압원 인버터의 유효전력  $P$ 와 같고, AC 축 전압 및 전류를 전압불변 회전형 좌표로 변환한 경우 각 주파수가 정확히 추정된다고 가정하면 전압원 인버터의 유효전력  $P$ 는 식 (18)과 같다.

$$p_{out} = P = (3/2)v_d^r i_d^{r*} \quad (18)$$

식 (17)의  $v_{dc}^2$ 은 DC 링크 전압의 동작점( $V_{dc}$ )에서 테일러 시리즈로 전개한 후, 2차 항 이상을 무시하고, 식 (18)을 식 (17)에 대입하면, 식 (17)은 식 (19)와 같이 된다.

$$2V_{dc} s v_{dc} = p_{in} - (3/2)v_d^r i_d^{r*} \quad (19)$$

식 (19)에서  $i_d^{r*}$ 를 제어 하면 DC 링크 전압 제어가 가능하고, 이를 위한 제어기를 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 5와 같다.

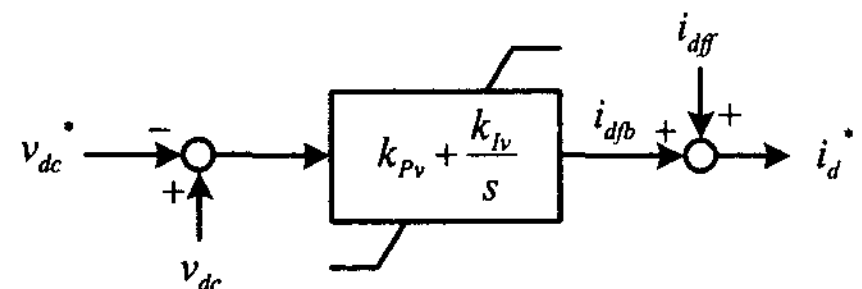


그림 5. DC 링크 전압 제어기  
Fig. 5. DC-link voltage controller

그림 5에서 제어기 출력  $i_d^{r*}$ 는 식 (20)과 같이 피드포워드 항과 피드백(feedback) 항으로 구분된다. 식 (20)에서 피드포워드 항을 식 (21)과 같이 두고, 이를 식 (19)에 대입하면 식 (22)를 구할 수 있다[6].

$$i_d^{r*} = i_{d_{ff}}^{r*} + i_{d_{fb}}^{r*} \quad (20)$$

$$i_{d_{ff}}^{r*} = 2p_{in} / 3v_d^r \quad (21)$$

$$2V_{dc} s v_{dc} = -(3/2)v_d^r i_{d_{fb}}^{r*} \quad (22)$$

식 (20)의 피드백 항은 그림 5로부터 식 (23)과 같이 나타낼 수 있고, 식 (23)을 식 (22)에 대입하면 식

(24)와 같은 전달함수를 구할 수 있다.

$$i_{dfb}^{r*} = (k_{pv} + k_{Iv}/s)(v_{dc} - v_{dc}^*) \quad (23)$$

$$\frac{v_{dc}}{v_{dc}^*} = \frac{(k_{pv}/k_v)s + k_{Iv}/k_v}{s^2 + (k_{pv}/k_v)s + k_{Iv}/k_v} \quad (24)$$

여기서  $k_{pv}$ ,  $k_{Iv}$ 는 각각 DC 링크 전압제어기의 PI-제어기 이득,  $k_v = 2CV_{dc}/3v_a^*$ 이다.

### 3. 사례연구

#### 3.1 양산지역 배전 계통

그림 6은 경상남도 양산시의 양산변전소로부터 전력을 공급받는 양산지역의 배전 계통도를 나타낸 것이다. 그림 6의 계통도에서 각 배전선로 임피던스[7-8]는 표 1과 같고, 부하의 임피던스는 표 2와 같다.

표 1. 22.9[kV] 배전선로의 임피던스  
Table 1. Impedances of 22.9[kV] distribution lines

| 선로 명   | Symbol | 임피던스[Ω]             |
|--------|--------|---------------------|
| 하북 D/L | $Z_1$  | $4.5251 + j10.6152$ |
| 유산 D/L | $Z_2$  | $1.0764 + j2.4260$  |
| 물금 D/L | $Z_3$  | $0.3132 + j0.4961$  |
| 어곡 D/L | $Z_4$  | $1.0706 + j2.4517$  |

표 2. 부하의 임피던스  
Table 2. Impedance of loads

| 지 역    | Symbol   | 임피던스[Ω]              |
|--------|----------|----------------------|
| 통도사    | $Z_{L1}$ | $49.8366 + j1.0892$  |
| 유산 공단  | $Z_{L2}$ | $55.2983 + j14.5915$ |
| 화성 R&D | $Z_{L3}$ | $45.3756 + j12.5941$ |
| 어곡 공단  | $Z_{L4}$ | $65.8421 + j23.0956$ |

표 3. 태양광 모듈 파라미터, HiS-M200SF  
Table 3. PV module parameter of HiS-M200SF

| Items                             | HiS-M200SF   |
|-----------------------------------|--------------|
| Maximum Power( $P_{max}$ )        | 200[W]       |
| Voltage at Pmax( $V_{mp}$ )       | 26.7[V]      |
| Current at Pmax( $I_{mp}$ )       | 7.47[A]      |
| Warranted minimum $P_{max}$       | 192.0[W]     |
| Short-circuit current( $I_{sc}$ ) | 8.19[A]      |
| Open-circuit voltage( $V_{oc}$ )  | 33.6[V]      |
| Temp. coefficient of $I_{sc}$     | 6.48[mA/°C]  |
| Temp. coefficient of $V_{oc}$     | -0.101[V/°C] |
| Temp. coefficient of Power        | -0.32[%/°C]  |
| Number of Cells in series         | 54           |
| Maximum system voltage            | 1000[V]      |

그림 6의 계통도에서 변압기 1차측 즉, 154[kV] 측에서 전원측으로 바라본 테브낭(thevenin) 등가 임피던스와 전원은 각각  $Z_{th} = 12.460 + j34.3657[\Omega]$ ,  $V_{th} = 172.89[kV]$ 와 같다. 154[kV]의 선로임에도 불구하고, 등가 전원의 크기가 상대적으로 크게 모델링된 이유는 실제로 전압강하를 고려하여 높은 전압으로 공급되고 있기 때문이다.

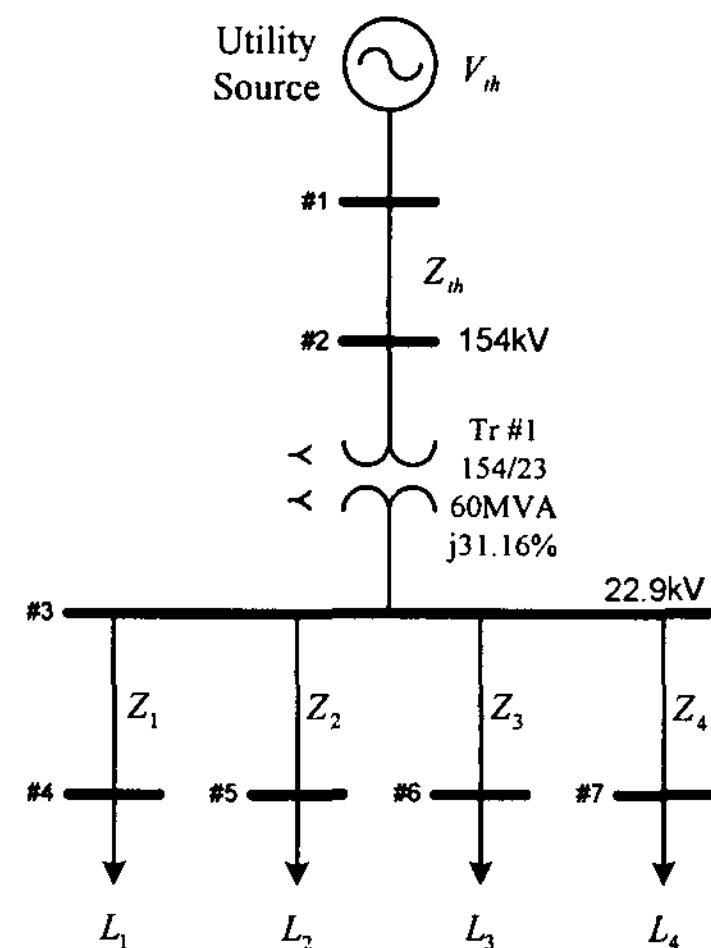


그림 6. 양산지역 배전 계통도의 단선도  
Fig. 6. One line diagram of distribution system in Yang-San area

### 3.2 시뮬레이션 모델

태양광 발전 시스템을 실제 적용에 적용한 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC에서 모델링하였다. 태양광 모듈은 현대중공업에서 제작되고 있는 200[W] 단위 모듈의 현대 HiS-M200SF 모듈을 이용하였다. 표 3은 현대 HiS-M200SF의 파라미터를 나타낸 것이다.

태양광 발전 시스템이 투입되는 곳은 그림 6에서 4번 모선, 즉 통도사 지역이다. 4번 모선은 22.9[kV]의 배전선으로 태양광 발전 시스템이 적용되기 위해 꽤 높은 전압이다. 따라서 태양광 발전 시스템의 출력은 변압기를 통하여 투입되게 하였다. 태양광 발전 시스템의 변압기는 0.38/22.9[kV], %Z = 6.0, 1.25[MVA]로 하였다.

태양광 발전 시스템의 전체 용량을 2[MW]로 구성하기 위해서 단위 태양광 발전 모듈은 4개 병렬 운전되고 단위 태양광 발전 모듈 2개당 하나의 변압기를 통하여 계통에 연계된다. 단위 태양광 발전 모듈의 어레이를 28개 직렬, 89개 병렬로 구성하여 개방 전압 및 최대 전력점에서의 전압과 전력이 각각 747.6[V], 940.8[V], 498.4[kW]가 된다. 이러한 태양광 발전 시스템을 그림 7에 나타내었다.

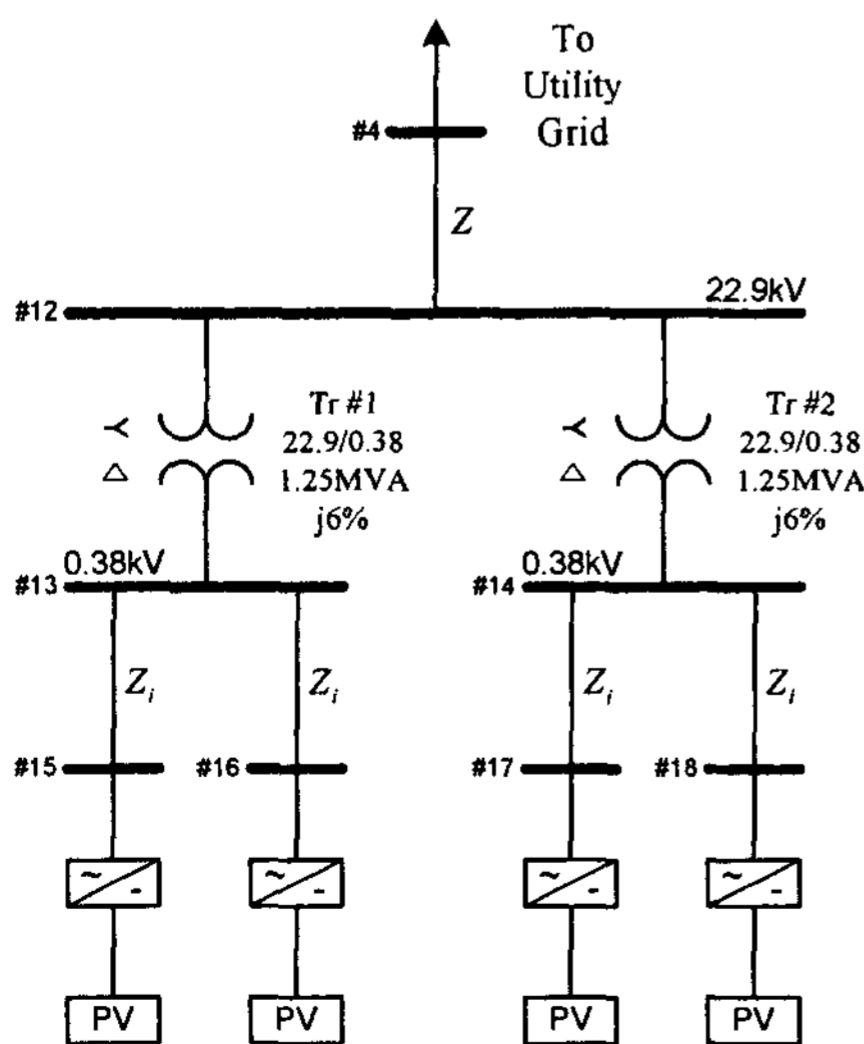


그림 7. 태양광 발전 시스템의 구성  
Fig. 7. Structure of PV generation system

태양광 발전 시스템은 실제 적용되기 위해서 많은 공간이 필요하다. 따라서 산 중턱 정도 설치되는 것을 상정하여 태양광 발전 시스템과 4번 모선 사이 거리를 500[m]로 하였고, 연계선로 전선은 ALOC160으로 하여 선로 임피던스를  $Z = 0.1422 + j0.3351 [\Omega]$ 로 고려하였다.

그림 7에서 각 태양광 발전 모듈은 계통과 연계되기 위해 계통연계 인덕터  $Z_i$ 를 가진다. 계통연계 인덕터는 태양광 발전 모듈의 인버터와 계통을 연결하고 인버터가 인덕터 전류를 제어하여 태양광 발전 모듈의 전력을 제어할 수 있게 해준다[9-10]. 계통연계 인덕터는 0.25[mH]로 하였다.

태양광 전지의 MPPT 제어는 인버터의 DC 링크 전압을 제어함으로써 제어 가능하다. 태양광 전지의 MPPT 제어를 위한 DC 링크 전압 제어기의 파라미터는  $\omega_c = 1000[\text{rad/sec}]$ ,  $\zeta = 0.866$ ,  $k_{pv} = 49.5$ ,  $k_{lv} = 12542.0$ 와 같고, DC 링크 축 커패시터는  $C_{dc} = 47000[\mu\text{F}]$ 이다. 인버터의 전류제어기의 파라미터는  $\omega_c = 3000[\text{rad/sec}]$ ,  $\zeta = 1.0$ ,  $k_{pd,q} = 0.75$ ,  $k_{ld,q} = 30$ 이다.

### 3.3 MPPT 제어

MPPT 제어는 증분 컨덕턴스 법을 이용하였다. MPPT 제어의 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다.

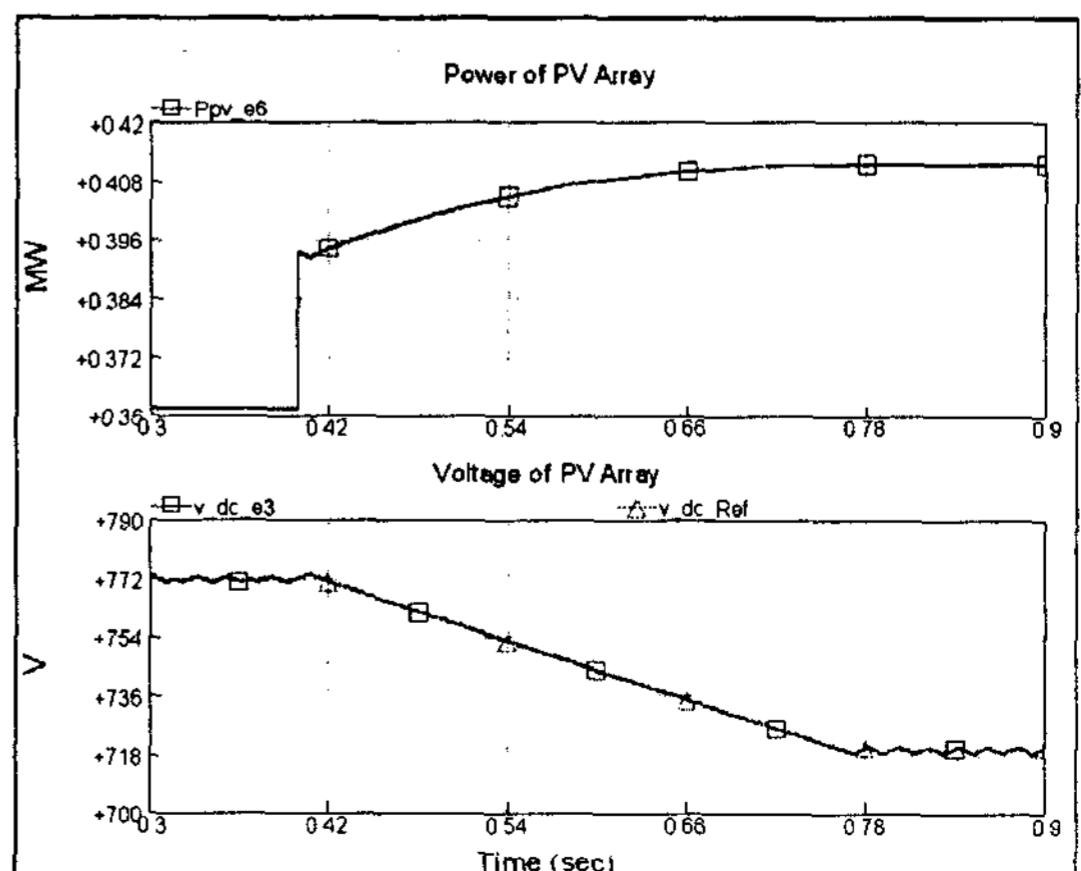


그림 8. MPPT 제어 결과  
Fig. 8. Results of MPPT control

MPPT 제어의 성능을 나타내기 위해 태양광 전지의 일사량은  $700 [W/m^2]$ 에서  $850 [W/m^2]$ 으로, 온도는  $15CENTIGRADE$ 에서  $30CENTIGRADE$ 로 순간 변화시켰다. MPPT 제어의 증분치  $\Delta V$ 는  $V_{dc}/1000.0$ 로 하여 DC 링크 전압의 크기에 따라 변하게 설정하였고, 샘플링 시간은  $5[msec]$ 로 하였다.

### 3.4 태양광 발전 시스템의 적용

태양광 발전 시스템을 통도사 지역, 즉 4번 모선에 투입하였다. 투입 전, 후를 비교하기 위해 1, 3, 4번 모선의 유효 및 무효전력과 1~7번 모선의 전압 크기를 표 4, 5에 나타내었다. 표 4, 5에서 일사량 및 온도는 각각  $700 [W/m^2]$ ,  $15 [CENTIGRADE]$ 이다.

표 4의 결과에서 투입 후 계통으로부터 공급되는 유효전력이 감소된 것을 알 수 있고, 유효전력 감소에 대한 무효전력 감소도 있음을 알 수 있다.

표 4. 태양광 발전 시스템의 투입 전, 후 유효 및 무효전력

Table 4. Real and reactive power before and after the application of PV generation system

| Bus No. |         | #1    | #3    | #4    |
|---------|---------|-------|-------|-------|
| 투입 전    | P[MW]   | 36.77 | 36.02 | 8.559 |
|         | Q[MVAr] | 21.05 | 10.45 | 0.189 |
| 투입 후    | P[MW]   | 35.74 | 35.04 | 9.001 |
|         | Q[MVAr] | 20.19 | 10.16 | 0.196 |

표 5. 태양광 발전 시스템의 투입 전, 후 모선 전압

| Bus No.     | #1    | #2    | #3    | #4    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 투입 전 [p.u.] | 1.123 | 1.079 | 1.011 | 0.906 |
| 투입 후 [p.u.] | 1.123 | 1.081 | 1.015 | 0.924 |
| Bus No.     | #5    | #6    | #7    |       |
| 투입 전 [p.u.] | 0.981 | 1.002 | 0.984 |       |
| 투입 후 [p.u.] | 0.985 | 1.006 | 0.989 |       |

표 6. 그림 9~10의 시뮬레이션 조건

Table 6. Simulation conditions for Fig. 9~10

| 그림 번호 | 온도 [°C] | 일사량 [ W/m <sup>2</sup> ] | 비고     |
|-------|---------|--------------------------|--------|
| 9     | 10      | 400-450-350-400          | 겨울을 상정 |
| 10    | 35      | 800-850-750 -800         | 여름을 상정 |

전압강하를 고려하여 높은 전압으로 전력이 공급되고 있음에도 불구하고, 표 5의 결과에서 투입 전 4번 모선 전압은 다른 모선 전압에 비해 매우 낮다. 이 경우 가벼운 선로사고 또는 부하의 증가로 인해 전압 붕괴(voltage collapse) 문제 등의 가능성이 있을 수 있다. 태양광 발전 시스템의 투입 후, 계통으로부터 공급되는 전력의 감소로 인한 선로 전압 강하가 감소되어 투입된 모선의 전압 보상뿐만 아니라 다른 부하 말단 전압도 보상을 관찰 할 수 있다. 표 4에서 4번 모선의 유효 및 무효전력의 증가는 전압 보상에 의해 증가된 것이다.

### 3.5 일사량 변화에 따른 출력 특성

태양광 발전 시스템의 동특성에 따른 계통의 영향을 평가하기 위해 일사량 변화에 따른 태양광 발전 시스템의 출력 특성과 연계된 모선의 전압 변동을 그림 9~10에 나타내었다.

그림 9는 겨울을 상정한 일사량 및 온도인 경우이고, 그림 10은 여름을 상정한 일사량 및 온도인 경우 태양광 발전 시스템의 동특성과 이에 따라 연계된 모선의 전압을 나타낸 것이다. 그림 9~10의 시뮬레이션 조건을 표로 요약하면 표 6과 같다. 그림 9~10에서 일사량 변동에 대한 4번 모선의 전압 변동은  $0.004 [p.u.]$  미만으로 부하 측에 영향을 미치지 못할 것으로 사료된다.

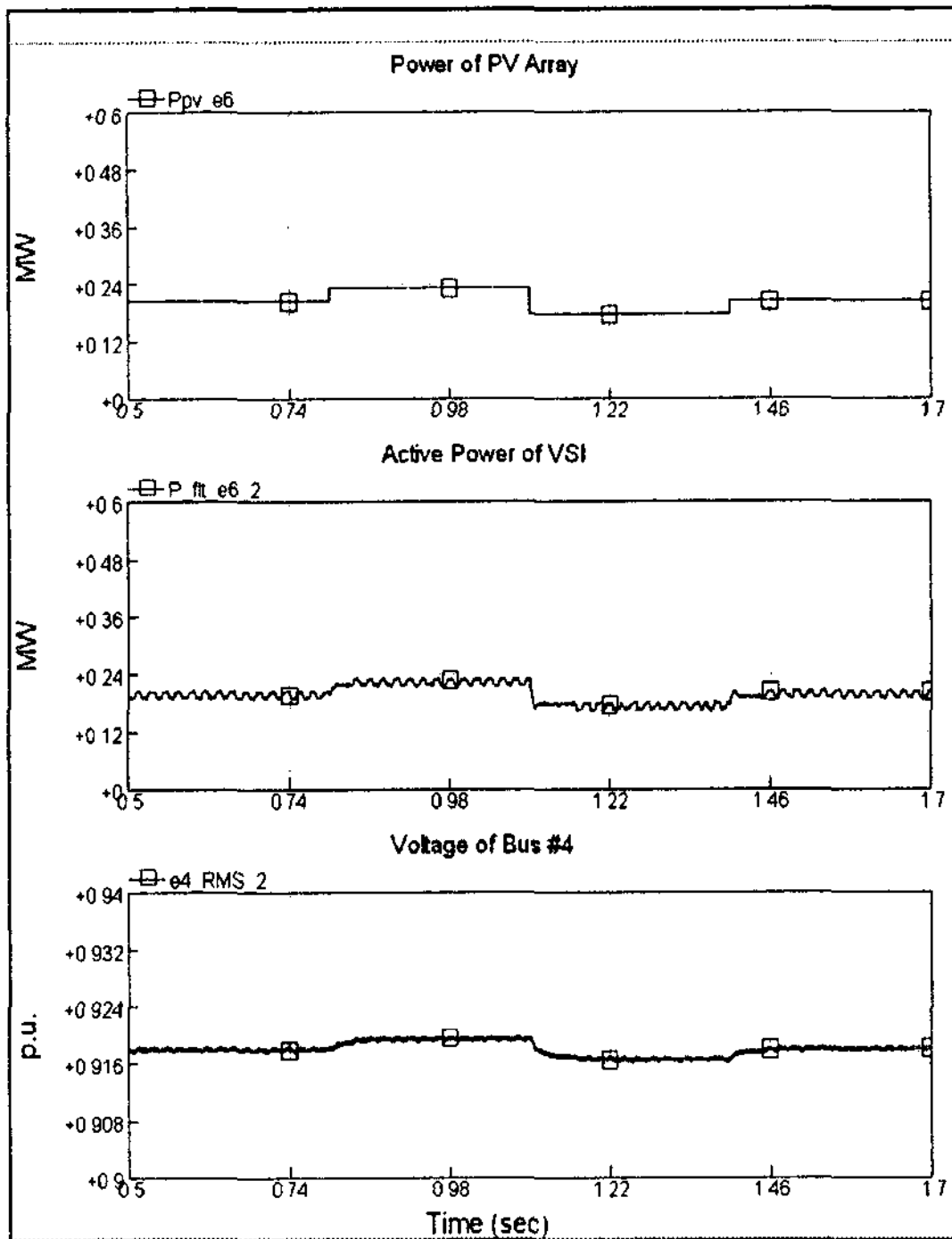


그림 9. 태양광 발전 시스템의 출력 특성과 4번 모선 전압의 변동  
 Fig. 9. Characteristics of the PV generation system and fluctuation of #4 bus voltage

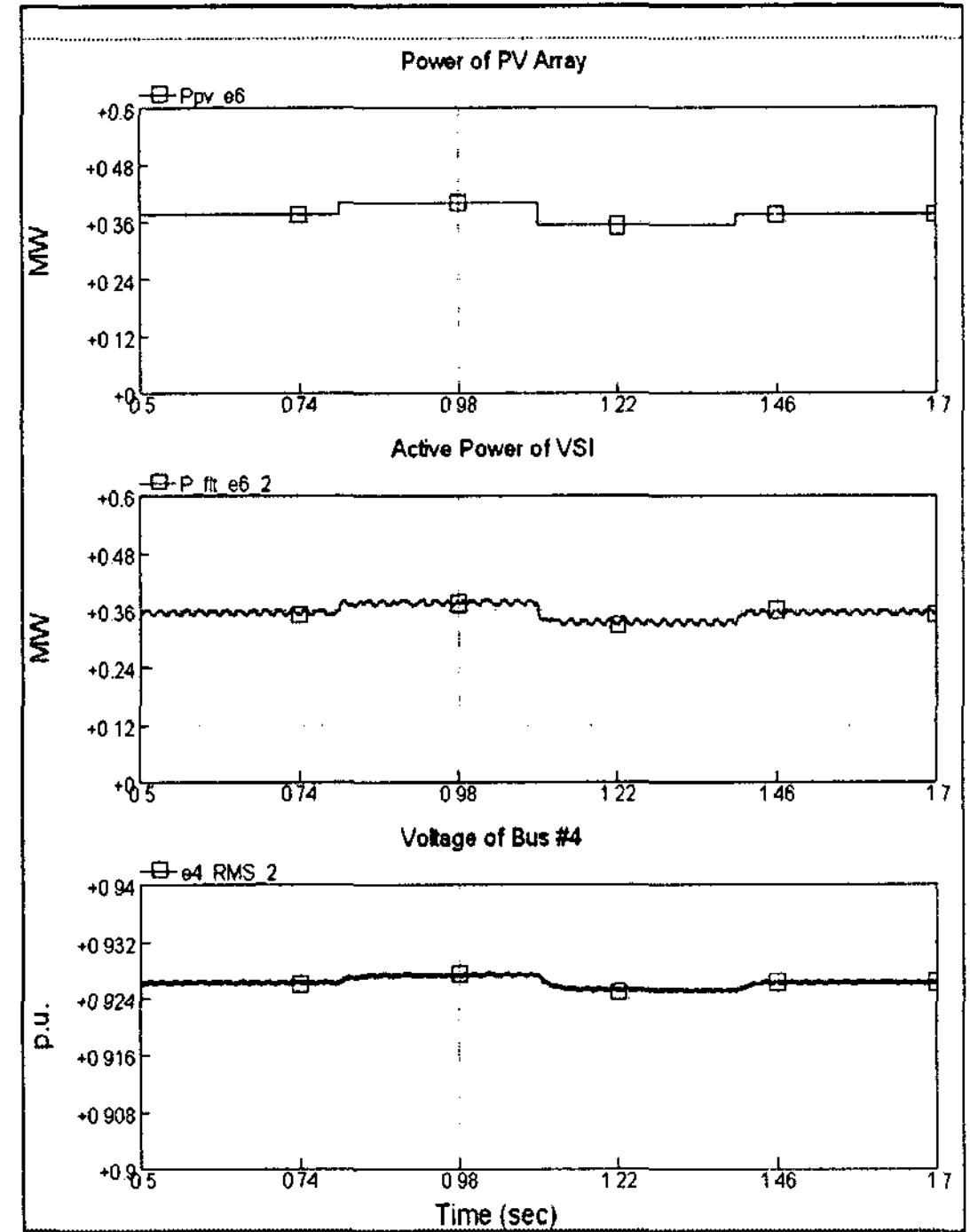


그림 10. 태양광 발전 시스템의 출력 특성과 4번 모선 전압의 변동  
 Fig. 10. Characteristics of the PV generation system and fluctuation of #4 bus voltage

#### 4. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지인 태양광 발전 시스템이 전력회사의 실계통에 적용되었을 때 전력품질 및 전압안정도에 미치는 영향을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모델에 관하여 연구하였다. 태양광 발전 시스템은 실제 적용 가능하게 현재 운전되고 있는 인버터를 적용하여 태양광 발전 시스템의 실계통 도입에 대해 검토하였다.

1) 모선 전압강하가 매우 큰 통도사 지역에 태양광 발전 시스템을 투입하여 선로 전압강하의 감소로 인한 부하의 말단전압 보상으로 전력품질이 개선되었다.

2) 모델링된 계통규모에서 태양광 발전 시스템의 기후변화에 따른 동특성이 모선 전압에 미치는 정도가 0.004 [p.u.] 미만으로 나타났고, 이는 부하에 영향을 미치지 않을 것이다.

본 논문에서 개발된 시뮬레이션 모델은 실계통의 태양광 발전 시스템의 도입과 부하 증설에 대한 대책 수립에 이용될 수 있고 말단부하 전압보상 시뮬레이션이 가능하여 전력회사의 고품질 및 안정적인 전력 공급에 이용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 대학전력연구센터 육성·지원사업 (I-2007-0-261-01)에 의한 마이크로그리드연구센터 주관으로 수행된 과제임.

#### References

[1] T. M. Rowan, R. J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No.4, pp. 678-690, Jul./Aug. 1986.  
 [2] J. W. Choi, S. K. Sul, "Fast Current Controller in Three-



Phase AC/DC Boost Converter Using d-q Axis Cross-coupling”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 1, pp. 179-185, Jan. 1998.

- [3] 이재형, 임동건, 이준신, “태양전지 원론”, 홍릉과학출판사, ISBN 89-7283-462-9, pp. 110-140, 2005.
- [4] 김슬기, 전진홍, 김응상, “PSCAD/EMTDC를 이용한 계통 연계형 태양광발전 시스템의 모델링 및 모의 해석”, 대한전기학회 논문지, 제54A권, 제3호, pp. 107-116, 2005. 3.
- [5] 설재웅, 장재정, 김동민, 이승혁, 김진오, “증분컨덕턴스 MPPT제어 기반 계통연계형 태양광 발전 시스템의 전력 품질 평가”, 대한전기학회 논문지, 제56권, 제1호, pp.8-13, 2007. 1.
- [6] 김용균, 최종우, 김흥근, “계통연계형 태양광 발전 인버터의 디지털 제어”, 대한전기학회 2004년도 하계학술대회 논문지, pp. 1161-1165, 2004. 7.
- [7] 한전 배전처, “배전 설계기준 및 표준 규격서”, 한국전력공사, 2006.
- [8] 한전 배전처, “배전 보호 기술서”, 한국전력공사, 1995.
- [9] 손광명, 이계병, 홍준희, “PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발”, 대한전기학회 논문지, 56권, 3호, pp. 457-464, 2007. 3.
- [10] 손광명, 김영섭, “Micro-Source의 계통 연계용 인덕터 크기 선정에 관한연구”, 한국조명전기설비학회 논문지, 19집, 6호, pp. 52-58, 2005. 9.

◇ 저자소개 ◇

**이계병 (李桂秉)**

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 고려대 대학원 전자전기공학과 박사과정.

**손광명 (孫光明)**

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 동의대 전기공학과 교수.

**전인수 (田仁秀)**

1955년 4월 14일생. 1984년 동의대 화학과 졸업. 2002년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동의대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년~현재 한국전력공사 부산사업본부 계기과장.