

# MATLAB 기반의 PLECS를 이용한 태양광 모델링 및 발전시스템 개발

논문

58-12-12

## Development of Photovoltaic Modeling and Generation System using PLECS in MATLAB

최규영\*\* · 김종수\*\* · 이영국\*\*\* · 이병국†

(Gyu-Yeong Choe · Jong-Soo Kim · Young-Kuk Lee · Byoung-Kuk Lee)

**Abstract** - In this paper, based on MATLAB which has characteristic that is simply applied to control algorithm and source modeling, photovoltaic modeling is implemented. Photovoltaic modeling is similarly performed PV array and simulated. Also, in order to output maximum power of PV, MPPT control is simulated. Moreover, simulation of converter is performed by means of PLECS (Piece wise Linear Electrical Simulation) which is easily made schematic of power electronics. Also, we compare simulation results and Sharp PV module and Suntech PV module. Finally, informative simulation of PV generation system is provided.

**Key Words** : Photovoltaic modeling, Photovoltaic generation system, PLECS, MPPT control

### 1. 서론

최근 세계적으로 발생하는 대규모 재난과 기상이변 등이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 현상의 원인으로 급격한 산업발달로 빚어진 지구온난화현상을 꼽고 있다. 이와 더불어 인류는 화석 연료의 고갈이라는 문제에 봉착해 있다. 이 문제를 해결하기 위해 세계 각국은 태양광, 풍력, 연료전지와 같은 신재생에너지원에 국가적인 차원에서 지원을 아끼지 않고 있다. 특히 유럽, 미국, 일본 등의 선진국은 대대적인 신재생에너지 보급정책 및 연구개발을 활발히 진행하고 있다[1].

신재생에너지 중 태양광 발전은 빛 에너지를 직접 전기 에너지로 변환 가능하며 소음 및 오염이 거의 없는 청정 에너지로써 가장 활발히 연구가 진행되고 있다. 우리나라에서도 또한 반도체 기술과 셀 제조 기술의 발달로 인하여 분산전원 발전시스템으로 널리 이용되고 있으며, 고효율 태양광(PV) 발전시스템을 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.

태양광 발전시스템은 독립형과 계통연계형으로 구분되며 독립형은 주로 섬, 오지 등의 전기 공급이 원활하지 않은 곳에 적용되고, 계통연계형 같은 경우는 주로 가정용과 대단지 발전용 및 산업체 빌딩에 응용된다. 이처럼 여러 곳에 응용되는 태양광 발전시스템의 신뢰성 확보를 위해서는 실제 시스템을 정확하고 쉽게 모델링 할 수 있는 시뮬레이션 툴이

필수적이다. 태양광 발전시스템의 시뮬레이션이 가능한 툴로는 PSIM, PSPICS, PSCAD, CASPOC, MATLAB 등이 있다[2-4]. 이 중 PSIM은 태양광 전력변환 장치의 구현 및 성능 확인이 간편하여 널리 사용되고 있지만, 태양광 모듈 및 다양한 제어기의 성능을 확인하기에는 프로그램과 회로가 복잡하다는 단점이 있다. 다른 툴로는 PV 모델링을 정확하고 간편하게 수행할 수 있으며, 컨트롤 알고리즘의 구현이 쉬운 MATLAB이 가장 널리 쓰이고 있지만 전력전자 회로의 구현이 복잡하다는 단점이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 PLECS를 이용하여 전력전자 회로를 시뮬레이션 하는 논문도 출간되고 있다[5-6].

그러므로 본 논문은 모델링과 제어회로 구현이 간편한 MATLAB을 이용하여 태양광 셀 및 모듈 모델링 수행하였으며 모델링 검증에 위하여 셀 특성 확인 및 실제 모듈인 일본 Sharp사의 ND-L5E6E와 중국 Suntech사의 STP240-24/Vb의 특성 비교 분석을 하였다. 또한 P&O (Perturbation and Observation) MPPT 제어기를 구현하였으며 전력회로 구현이 간편한 PLECS를 이용하여 부스트 컨버터를 구현하였다. 이로써 MATLAB 기반의 태양광 발전시스템 시뮬레이터를 구축하였고 MPPT제어 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 태양광 발전시스템

#### 2.1 태양전지 모델링

태양전지 모델링을 하기 위해선 태양전지의 등가모델을 필요로 한다. 태양전지 등가모델은 3가지 형태로 분류된다. 직렬저항만 고려된 형태, 직병렬 저항 형태와 두 개 다이오드와 직병렬 저항 형태이다. 직렬저항만 고려된 형태는 등가 모델은 간단하지만 병렬저항 특성을 표현하지 못한다. 다이오드 2인 형태는 상세한 특성을 확인할 수 있지만 정확한 피아미터를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 1개 다이오드

\* 준회원 : 성균관대 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

\*\* 정회원 : 성균관대 전자전기컴퓨터공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 : 현대자동차 하이브리드설계팀 선임연구원 · 공박

† 교신저자, 시니어회원 : 성균관대 전자전기컴퓨터공학과 교수

E-mail : bkleeskk@skku.edu

접수일자 : 2009년 10월 15일

최종완료 : 2009년 11월 21일

와 직병렬저항을 가진 형태는 병렬저항 특성을 볼 수 있으며 등가 모델이 간단하고 특성 또한 오차가 거의 없어 널리 사용된다. 본 논문에서는 여러 등가모델 중 성능 좋고 간단한 단일 다이오드와 직렬저항, 병렬저항으로 구성된 등가모델을 이용하였다. 등가모델은 그림 1과 같다.

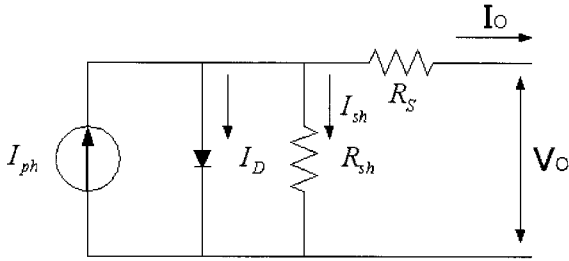


그림 1 태양전지 등가모델

Fig. 1 Equivalent model of photovoltaic cell

그림 1로부터 부하로 전달되는 전류는 (1)과 같다.

$$I_o = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

여기서,  $I_o$ 는 출력전류,  $I_{ph}$ 는 광전류,  $I_D$ 는 다이오드 전류,  $I_{sh}$ 는 병렬저항에 흐르는 전류이다.

광전류는 일사량과 온도의 함수로써 (2)와 같이 정의 하며 단락전류 온도계수 또한 광전류에 영향을 끼친다. 다이오드 전류는 역포화 전류함수로써 (3)과 같다. 병렬저항에 흐르는 전류는 태양전지 손실로써 (4)와 같고, 병렬저항은 (5)같이 표현된다. 역포화 전류는 다시 온도의 함수로써 (6)와 같다. 역포화 전류는 온도에 민감하며 온도가 증가 할수록 증가하게 된다[3].

$$I_{ph} = I_{scr} \frac{S}{S_{ref}} + K_i (T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_D = I_{sat} \left( e^{\left( \frac{q(V_o + I_o R_s)}{AkT} \right)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_o + I_o R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{oc}}{I_{scr} - I_{sat} \left( e^{\left( \frac{qV_{oc}}{Ak(25+273.15)} \right)} - 1 \right)} \quad (5)$$

$$I_{sat} = I_{satr} \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_{bg}}{Bk} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

위에서 사용된 전체 변수는 다음과 같다.

- $I_{scr}$  : 기준온도 단락전류
- $V_{bg}$  : 셀 밴드갭
- $S$  : 일사량

- $S_{ref}$  : 기준 일사량
- $K_i$  : 단락전류 온도계수
- $T$  : 셀 온도
- $T_{ref}$  : 셀 기준온도
- $I_{sat}$  : 역포화 전류
- $q$  : 전하량
- $A, B$  : 태양전지 상수
- $k$  : 볼츠만 상수
- $R_s$  : 직렬저항
- $R_{sh}$  : 병렬저항
- $I_{satr}$  : 기준온도 역포화 전류
- $E_{bg}$  : 셀 밴드갭

## 2.2 MPPT 제어

태양전지는 다른 발전 전원과 달리 일사량과 온도와 같은 환경적인 요인에 발전량이 결정된다. 그렇기 때문에 효율적인 태양광 발전을 위해서는 일사량과 온도에 따라 변하는 출력전력량의 최대치를 추종하는 제어 알고리즘이 필요하다. 이런 최대전력점 추종(MPPT) 알고리즘 중 제어가 간단하고 DSP로 구현시 수행시간이 짧아 많이 사용되고 있는 것이 P&O 알고리즘이다. P&O 알고리즘의 순서도는 그림 2와 같다.

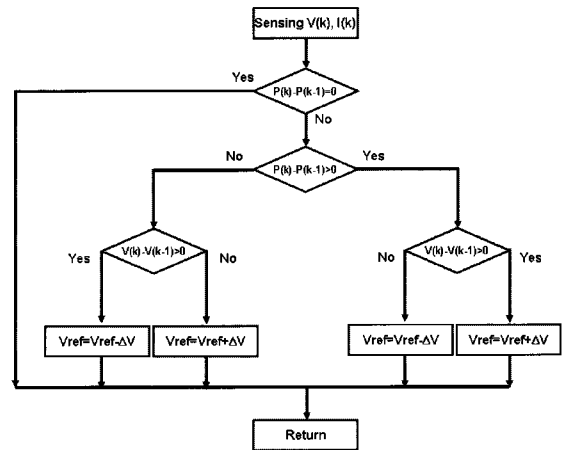


그림 2 P&O MPPT 알고리즘

Fig. 2 P&O MPPT Algorithm

P&O 알고리즘은 일정한 크기의 전압을 증가 또는 감소시키면서 레퍼런스 전압을 변동시켜 이전 전력과 현재 전력을 비교하면서 최대전력 전달점을 찾는 방법이다. 본 논문에서는 최대전력 전달점에서 일사량 변화가 작을 시에 발생하는 자려진동을 감소시키기 위해  $\Delta V$ 를 0.8V로 하여 시뮬레이션 하였다[4-5].

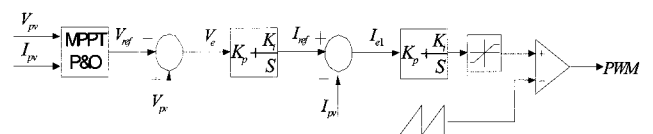


그림 3 MPPT 제어기

Fig. 3 MPPT controller

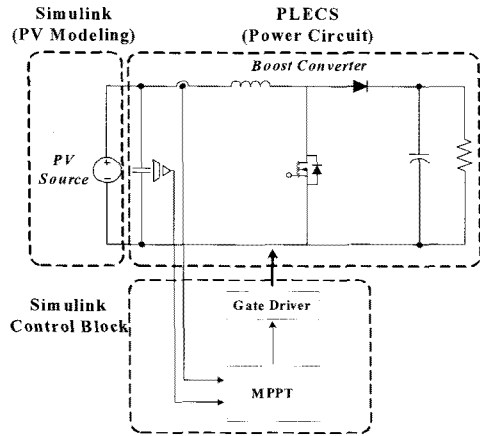


그림 4 태양광 발전 MPPT 제어 시스템  
Fig. 4 MPPT control system of photovoltaic

그림 3은 MPPT 제어기를 보여준다. MPPT 제어기의 동작은 태양전지에서 전압과 전류를 센싱 받아 P&O 알고리즘을 통해 MPPT 전압 레퍼런스를 생성한다. 이렇게 생성된 레퍼런스는 태양전지 전압과 비교되고 PI 제어기를 거친 후 전류 레퍼런스를 생성하고 다시금 PI제어기를 거친 후 최종 지령치를 생성한 후 톱니파와 비교하여 PWM을 생성하게 된다.

그림 4는 본 논문에 시뮬레이션 된 태양광 발전 MPPT 제어 시스템이다. 하드웨어는 태양광발전 시스템 PCS에 주로 사용되는 부스트 컨버터이고 PLECS를 사용하여 구성되었다. 제어는 MATLAB Simulink로 모델링된 태양광 모듈의 전압과 전류를 센싱 받고, 센싱된 전압과 전류는 MPPT 제어기 입력으로 사용되고 MPPT제어를 수행한다.

### 3. 시뮬레이션 모델

#### 3.1 태양광 셀 및 모듈 모델

그림 5는 본 논문에서 구현한 전체 시스템 시뮬레이션 프로그램이며, 크게 태양전지, 전력변환기, 제어기로 구분할 수 있다.

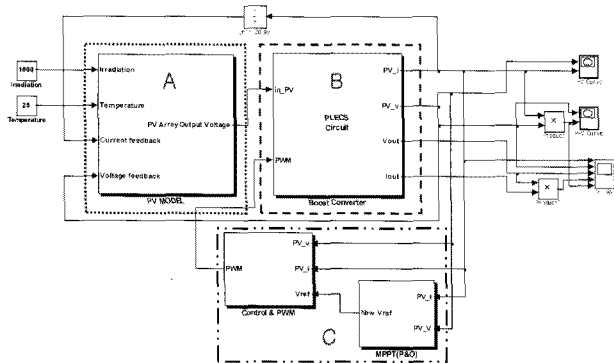


그림 5 태양광발전 시스템  
Fig. 5 Photovoltaic Generation system

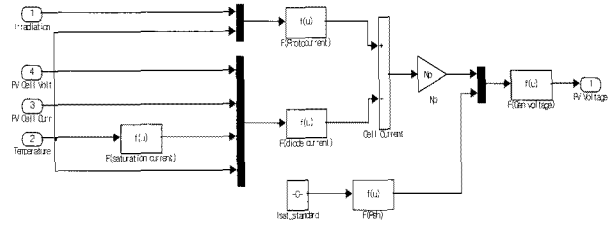


그림 6 태양광 발전 MPPT 제어 시스템  
Fig. 6 MPPT control system of photovoltaic

그림 5의 A 부분은 태양전지 모델링부분이다. 입력은 두 가지로써 여러 가지 일사량 및 온도 조건을 설정할 수 있도록 일사량과 온도를 가변 가능하게 만들어 졌다.

그림 6은 A 부분의 상세 블록도 이다. A 부분은 위에서 언급한 (1)-(6)식을 바탕으로 MATLAB의 Function 블록을 사용하여 수학적 모델링이 되었다. 또한 태양광 모듈을 모의 할 수 있도록 직렬 셀 개수와 병렬 셀 개수가 조절 가능하며, 기준온도 단락전류, 역포화 전류, 직렬저항, 병렬저항, 셀 밴드갭등 상세한 셀 특성이 조절 가능하다.

#### 3.2 PLECS 하드웨어 모델 및 MPPT 제어기

그림 7은 기존에 MATLAB에서 복잡하게 구현되었던 부스트 컨버터를 PLECS를 이용하여 구현한 회로이다. 회로가 상당히 간단하며 인덕터와 커패시터 스위치 값 및 상태를 손쉽게 변경가능하다.

그림 8은 MPPT 제어블록으로 P&O 알고리즘으로 구현되었다. MPPT 제어블록은 Simulink의 IF 및 ELSE 블록을 이용하여 구현되었다. 블록에서는 전력을 계산하여 MPPT제어가 수행되며 전압지령치를 생성하며, 또한  $\Delta V$ 를 조절 가능하게 하였다.

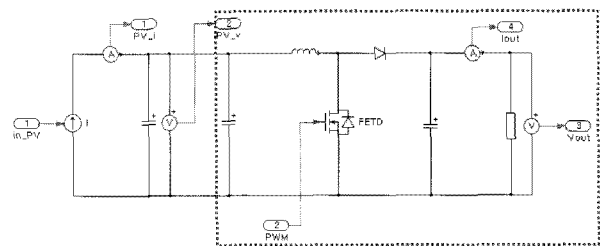


그림 7 부스트 컨버터  
Fig. 7 Boost converter

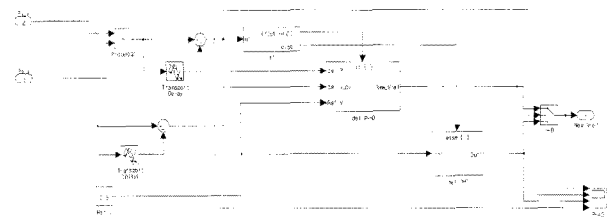


그림 8 MPPT 제어블록  
Fig. 8 MPPT control block

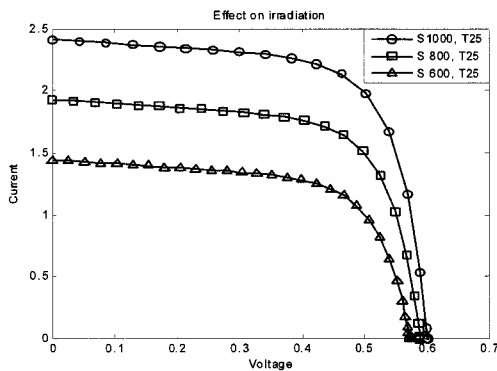
#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 태양광 셀 및 모듈 특성

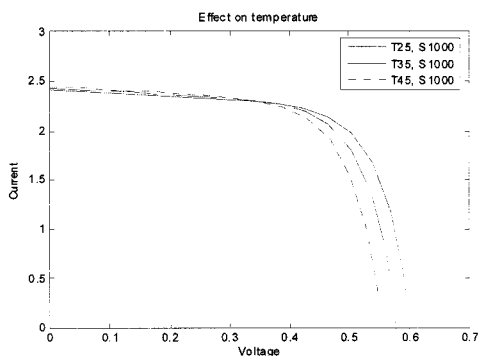
본 절에서는 위에서 언급하였던 태양광 셀의 수학적 이론을 바탕으로 모델링된 태양전지 셀 및 모듈 모델링의 특성이 분석되었다. 셀은 일사량과 온도의 변화 특성에 따른 출력 전압 전류 특성을 표현하여 모델링의 타당성을 검증하였으며, 모듈은 태양전지 모듈의 세계적인 판매업체인 Sharp와 Suntech사의 제품의 특성을 모의함으로써 타당성을 검증하였다.

그림 9는 일사량과 온도 변화에 따른 태양광 셀 특성 그래프를 나타낸다. 그림 9(a)는 일사량 변화에 따른 태양광 셀 특성 그래프이다. 일사량이 감소함에 따라서 출력전류를 크게 감소하고 전압은 미세하게 감소함을 볼 수 있으며, 전력 또한 감소함을 예상할 수 있고, 이는 이론적인 내용과 부합함을 알 수 있다. 그림 9(b)는 일사량은 1000W/m<sup>2</sup>으로 고정이며 온도가 가변 되었을 때의 태양광 셀 출력 전압 전류 특성 그래프이다. 온도가 증가함에 따라 출력 전압을 감소함을 볼 수 있으며 출력전류는 미세하게 증가하지만 전압에 더 크게 감소하게 때문에 감소함을 알 수 있다. 이 또한 이론적인 내용과 부합함을 알 수 있다.

그림 10은 모델링된 태양광 모듈의 특성과 실제 제품의 특성을 비교해서 나타내었다. 모듈은 일본 Sharp사의 ND-L5E6E 모델로 125W 용량이다.



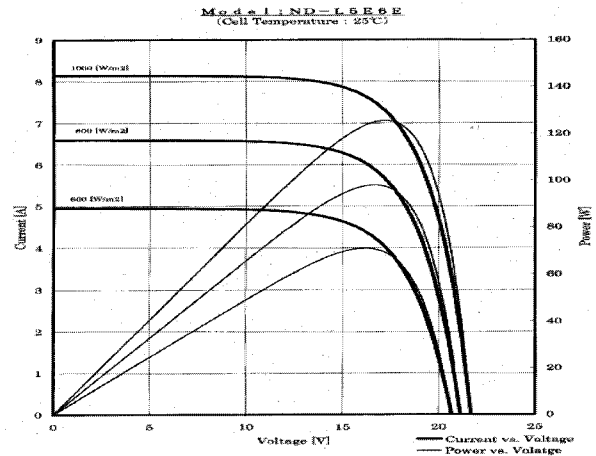
(a) 일사량 변화



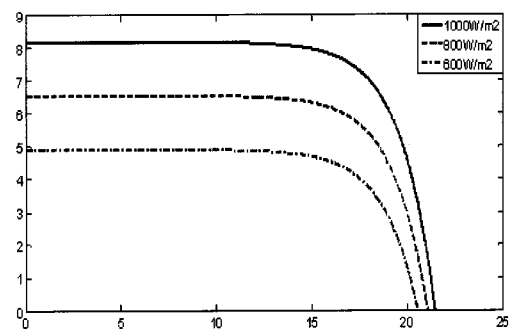
(b) 온도 변화

그림 9 태양광 셀 특성

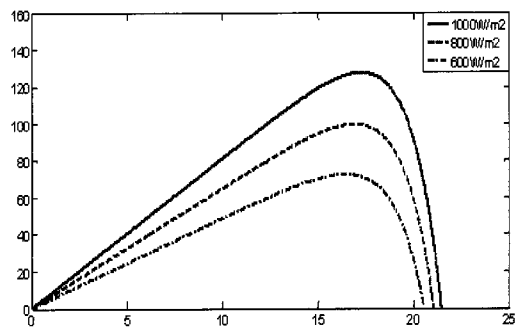
Fig. 9 Photovoltaic cell characteristic



(a) Sharp사 ND-L5E6E 특성곡선



(b) 모델링된 모듈 I-V 특성 곡선



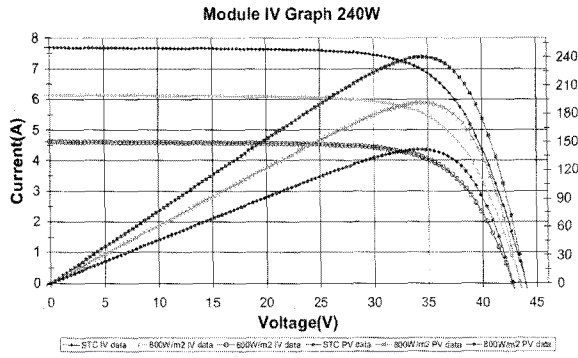
(c) 모델링된 모듈 P-V 특성 곡선

그림 10 태양광 모듈 특성비교 (Sharp)

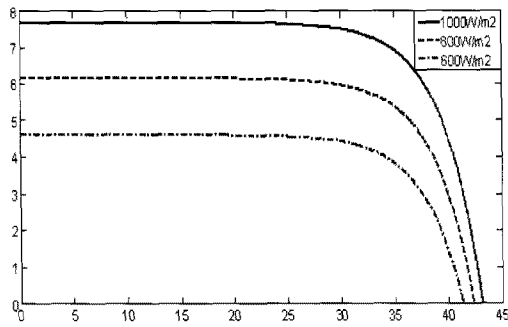
Fig. 10 Comparison of photovoltaic module characteristic

개방전압은 21.7V이고 단락전류는 8.14A의 특성을 가지고 있으며, 그림 10(a),(b),(c)의 x축과 y축 스케일은 동일하다. 일사량이 1000W/m<sup>2</sup>-600W/m<sup>2</sup>으로 변화시 모듈의 I-V, P-V 그래프는 모델링된 특성 그래프와 거의 일치함을 확인 할 수 있다.

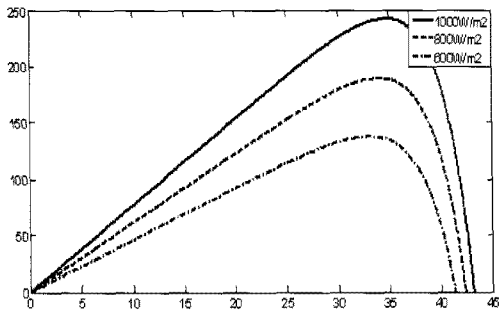
그림 11 또한 실제 제품의 모듈 특성을 비교해서 나타내었다. 시뮬레이션의 신뢰성을 위한 그림 10과는 다른 회사인 중국 Suntech사의 STP240-24/Vb 모델을 사용하였다. 모듈 용량은 240W 용량이다. 일사량 변화시 모듈의 I-V, P-V 곡선과 모델링된 모듈의 곡선이 일치함을 확인 가능하다.



(a) Suntech사 STP240-24/Vb 특성곡선



(b) 모델링된 모듈 I-V 특성 곡선



(c) 모델링된 모듈 P-V 특성 곡선

그림 11 태양광 모듈 특성비교 (Suntech)

Fig. 11 Comparison of photovoltaic module characteristic

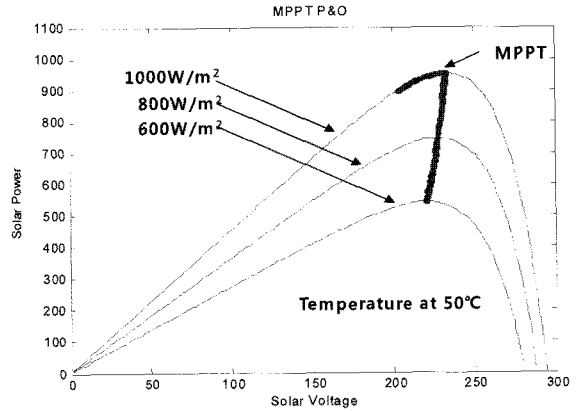
### 4.2 MPPT 특성

본 논문에서는 개발된 태양광 발전시스템의 MPPT 특성을 검증하기 위해 150W 모듈 7개를 직렬로 연결하여 1kW 급 시뮬레이터를 구성하여 시뮬레이션을 실행하였다. 표 1 은 150W 모듈의 전기적 파라미터이다.

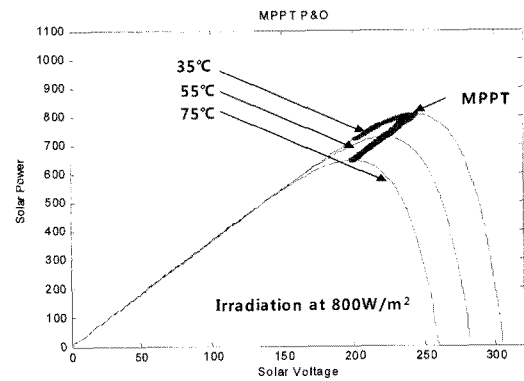
표 1 시뮬레이션 모듈 파라미터

Table 1 Simulation module parameters

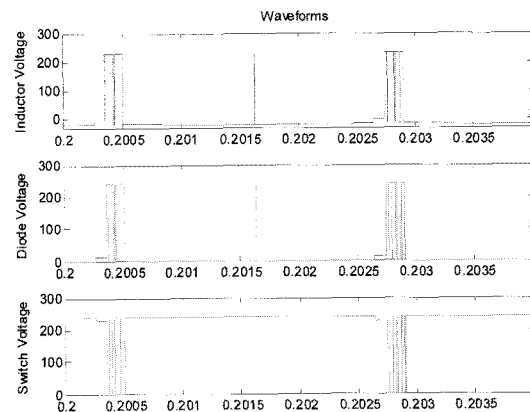
변수	값 [단위]
모듈 정격	150 [W]
개방 전압	43.4 [V]
단락 전류	4.8 [A]
MPPT 전압	34.1 [V]
MPPT 전류	4.4 [A]



(a) 일사량 변화시 MPPT 성능



(b) 온도 변화시 MPPT 성능



(c) MPPT시 각부 전압파형

그림 12 MPPT 성능 및 각부 파형

Fig. 12 MPPT performance and voltage waveform

그림 12는 MPPT 성능 및 각부 전압파형을 나타낸다. 그림 12(a)는 셀 온도 50°C에서 일사량이 1000W/cm<sup>2</sup>-600W/cm<sup>2</sup>으로 선형적으로 변동하여 MPPT를 표시한 것이다. 일사량 변동시 각 일사량의 I-V커브의 최대전력점을 정확히 추종하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 12(b)는 일사량은 고정이고 온도가 선형적으로 감소시의 MPPT 성능결과로써 MPPT 추종을 하고 있음을 알 수 있다. 그림 12(c)는 일사량 변화에 따른 MPPT 추종 시 인덕터, 다이오드, 스위치 전압을 나타낸 것으로 정상적으로 동작함을 확인 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 고 효율 태양광발전 시스템을 개발하기 위해 필수적인 태양전지 및 모듈 모델링을 MATLAB기반으로 수행하였으며, 시뮬레이션 모델 검증에 위하여 Sharp사의 ND-L5E6E와 중국 Suntech사의 STP240-24/Vb 모델의 I-V, P-V 특성을 비교분석을 하였다. 또한 PLECS를 이용하여 태양광 발전시스템을 구성하였고, MPPT 제어를 수행하여 일사량 및 온도에 변화 따른 제어기 성능을 확인하여 태양광발전 시스템 성능을 확인 하였다. 이 결과를 통해 어떠한 태양전지 및 모듈의 특성을 확인할 수 있을 것이며 시스템의 제어성능의 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 산자부, "신재생에너지 RD&D 전략 2030 [태양광]," 2007.
- [2] A. Luque, S. Hegedus (ed.), Handbook of photovoltaic science and engineering, Wiley, 2003, ISBN 0-471-49196-9.
- [3] L. Castañer, S. Silvestre, Modeling photovoltaic systems using PSpice®, Wiley, 2002, ISBN 0-470-84528-7
- [4] B. Fry, "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems," Wisconsin, M.S. Theses, 1998.
- [5] M. Ciobotaru, T. Kerekes, R. Teodorescu, A. Bouscayrol, "PV inverter simulation using MATLAB/Simulink graphical environment and PLECS blockset", IEEE IECON 2006, pp. 5313-5318, Nov, 2006
- [6] B. K. Bose, P. M. Szczesny, R. L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-21, No. 5, pp. 1182-1191, Sept. 1985.

## 저 자 소 개



### 최 규 영 (崔奎英)

1980년 4월 11일생. 2006년 건양대학교 정보제어공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.

Tel : 031-299-4638

E-mail : lovesagaji@skku.edu



### 김 중 수 (金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정. 2000년 2월-2004년 7월 SEMIKRON Solution Centre Asia Application Engineer.

Tel : 031-299-4638

E-mail : sniper75@skku.edu



### 이 영 국 (李永國)

1970년 9월 3일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2007년 Georgia Institute of Technology 전기공학과 졸업 (공학박사). 1996년 2월-1999년 12월 현대정공 주임연구원. 2006년 1월-2007년 7월

Research Assistant, Georgia Institute of Technology.

2000년 1월-현재 현대자동차 하이브리드 설계팀 선임연구원. Tel : 031-368-2196

E-mail : yklee70@hyundai-motor.com



### 이 병 국 (李秉國)

1968년생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업 (공학박사). 2002년 1월-2003년 1월 Postdoctoral Research

Associate, Texas A&M University 2003

년4월-2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전

자그룹 선임연구원 (팀장). 2006년 3월-현재 성균관대학

교 정보통신공학부 조교수. 2004년 -현재 IEEE Senior

Member. 2007년-현재 Associate Editor, IEEE Industrial

Electronics Society (IES), ICEMS2007 및 IEEE

INTELEC2009 Secretary General, 2009년-현재 KIEE

Senior Member, 현재 당 학회 영문지 간사, 전기역사전

문위원회 간사, B부문 총무이사.

Tel : 031-299-4581

E-mail : bklee@skku.edu