

## I-V 특성곡선을 통한 태양전지 패널의 모델 파라미터 추출 방법

최성원<sup>1</sup>, 류지형<sup>1</sup>, 이창구<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>전북대학교 전자공학부

### Analytical Methods for the Extraction of PV panel Single-Diode model parameters from I-V Characteristic

Sung-Won Choi<sup>1</sup>, Ji-Hyung Ryu<sup>1</sup> and Chang-Goo Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Electronic engineering, Jeonbuk National University

**요약** 태양광 발전 시스템은 친환경성을 바탕으로 설치용량이 증가하고 있으며 효율 개선을 위한 연구가 활발하다. 고 효율 시스템 설계를 위해서는 태양전지 패널의 출력특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 태양전지 패널은 단일 다이오드 모델로 물리적 특성을 표현할 수 있으나, 정확한 파라미터를 얻는 것은 여러 단계의 측정과 수치해석 등의 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 본 논문에서는 패널 제조사의 데이터 시트에 제공되는 태양전지 패널의 I-V 특성곡선을 기반으로 패널의 단일 다이오드 모델의 특성 파라미터를 추출하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법의 검증은 위하여, Simulink의 Solar Cell 블록에 추출한 파라미터를 입력하여 출력을 측정하고, 데이터 시트와 오차를 계산하였다.

**Abstract** Photovoltaic System is increasing install capacity based on environmental-friendly characteristics. It have been actively studied to improve the efficiency. In order to design highly efficient system, it is important to understand the output characteristics of solar panels. The single diode model can represent the physical characteristics of solar panel. But it needs complex process such as mutli-step measurement and numerical analysis to get the exact parameters. In this paper, The method for extracting characteristic parameters of the single diode model based on the I-V characteristic curves in the panel manufacturer's data-sheet is presented. To verify the proposed method, solar cell model constructed in simulink. Simulink model output compared with output graph in datasheet.

**Key Words** : PV Panel Model; Single-Diode Model; Parameter Extraction

### 1. 서론

최근 태양광 발전 시스템은 친환경성을 바탕으로 설치용량이 증가하고 있으며, 효율 개선을 위한 연구가 활발하다. 높은 변환효율을 갖는 시스템을 설계하기 위하여, 태양전지 패널의 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 태양전지 패널의 특성 파라미터는 개발된 태양전지 패널의 성능 평가, 전력변환기의 효율 개선, 발전 시스템의 스트링 구조 설계 등에 활용될 수 있다.

태양전지 패널은 단일 다이오드 모델로 물리적 특성을 표현할 수 있다. 그러나 비선형 형태로 여러 개

의 파라미터가 얽혀 있는 단일 다이오드 모델의 I-V 관계식에서, 정확한 파라미터를 얻는 것은 수학적으로 복잡한 과정을 필요로 한다.

또한, 태양전지 패널의 모델 파라미터를 얻는 것은 직접적인 측정은 불가능하므로 여러 가지 추정 방법이 연구되어 왔다. 모델 파라미터 추출에 관한 기존의 방법으로는, 매우 낮은 일사량에서 개방전압과 단락전류를 측정하여 병렬저항을 계산하는 방법 [1], 이상 계수를 알고 있는 상태에서 직렬저항을 계산하는 방법[2], 암실에서 태양전지에 전압을 인가하여 다이오드 특성 곡선을 얻고 광 조사 상태의 특성 곡선과 비교하여 직렬 저항을 구하는 방법[3], 하나

\*교신저자 : 이창구(changgoo@jbnu.ac.kr)

접수일 10년 12월 10일

수정일(1차 11년 01월 14일, 2차 11년 01월 24일)

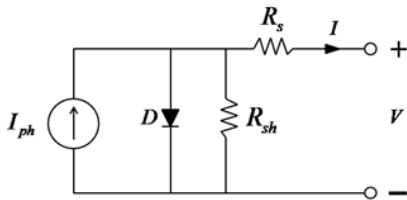
게재확정일 11년 02월 10일

의 I-V 특성 곡선에서 단락조건, 개방조건, 최대전력 조건으로 3개의 방정식을 정리하고 수치해석으로 비선형 연립방정식의 해를 구하여 파라미터를 얻는 방법[3,4] 등이 있었다.

[1-3]의 방법으로는 5개 파라미터를 모두 추출할 수 없으며 [3]의 방법은 여러 번의 측정을 필요로 한다. [4,5]의 방법은 수치해석법을 이용하므로 정확도는 높으나 초기치 결정에 따라 많은 연산시간을 필요로 하거나 수렴하지 않을 수 있다.

본 논문에서는, I-V 특성곡선을 이용하여 단일 다이오드 모델의 5개 파라미터를 추출하는 방법을 제시한다. 기존의 수치해석법에 비하여 초기치 문제가 없어 빠른 결과를 얻을 수 있다. 정확성 검증을 위하여 추출한 파라미터를 Simulink의 Solar Cell 입력하여 출력을 측정하고, 데이터 시트와 오차를 계산하였다.

## 2. 태양전지 패널 특성모델



[그림 1] 태양전지 패널의 단일 다이오드 모델

태양전지 패널의 정특성을 나타내는 단일 다이오드 모델은 그림 1과 같다. 태양전지는 pn접합의 광전효과를 발전에 이용한 것으로, 광 전류원과 다이오드로 특성을 묘사할 수 있다. 여기에  $R_s$ 는 물성이나 금속 접합면에서의 저항에 해당하고,  $R_{sh}$ 는 태양 전지 안에서의 누출 전류에 대응한다[5].

그림 1의 모델에 해당하는 수학적 표현은 다음과 같다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{V + IR_s}{N_s V_t} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

여기서  $V_t$ 는 열전압으로

$$V_t = \frac{AkT}{q} \quad (2)$$

이다. 두 수식 안의 파라미터들은 각각

$I_{ph}$ : 광 생성 전류

$I_0$ : 암전류

$R_s$ : 패널의 직렬저항

$R_{sh}$ : 패널의 병렬저항

$A$ : 다이오드의 이상 계수

$k$ : 볼츠만 상수

$q$ : 전자의 전하량

$N_s$ : 패널 내의 태양전지 직렬연결 수

$T$ : 절대온도

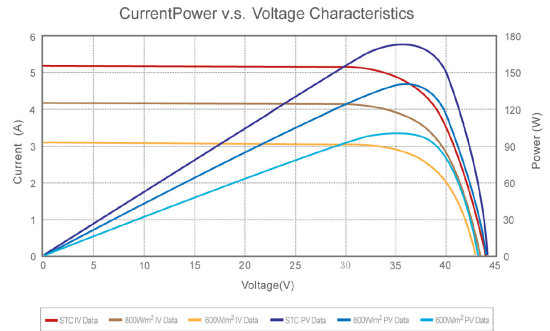
와 같다.

태양전지 패널의 특성 파악을 위하여, 미정계수인  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $A$  등 5개 파라미터의 정확한 값이 필요하다.

## 3. 파라미터 추출 방법

### 3.1 I-V 특성곡선의 활용

I-V 특성곡선을 통하여, 제시된 파라미터 추출 방법에 필요한 몇 가지 특성 수치를 얻을 수 있다. I-V 특성곡선은 직접적인 측정으로 완성하거나, 그림 2와 같이 제조사의 데이터 시트에 제공되는 것을 활용할 수 있다.



[그림 2] 패널의 I-V 특성곡선

패널 제조사에서는 그림 2와 같이 I-V 특성곡선을 데이터 시트에 제공한다[6]. 여기서 확인해야 할 주요 특성수치는 다음과 같다.

$I_{sc}$ : 단락 전류

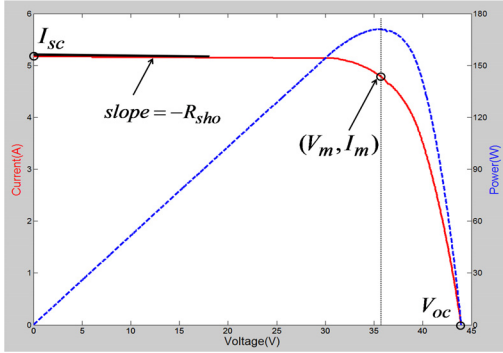
$V_{oc}$ : 개방 전압

$I_m$ : 최대전력점 전류

$V_m$ : 최대전력점 전압

$$R_{sho} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{sc}}$$

그림 3은 I-V 특성곡선 상에 필요한 특성수치를 표시한 것이다. 위 특성수치들은 이후의 파라미터 추출 과정에 사용된다.



[그림 3] I-V 특성곡선상의 주요 수치

### 3.2 파라미터 추출

앞 절에서 수집된 정보를 바탕으로 태양전지 패널의 모델 파라미터 추출 수식을 전개한다.

개방조건, 단락조건, 최대전력점에서 식(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}\right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$0 = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_m = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{N_s V_t}\right) - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

여기서  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ 은 앞 절에서 설명한 바와 같이 얻을 수 있다. 그리고 낮은 전압에서 손실요인은 주로  $R_{sh}$ 가 되기 때문에,  $R_{sh}$ 는 단락조건에서 전류에 대한 전압의 미분으로 구할 수 있다.

$$R_{sh} = R_{sho} \quad (6)$$

식 (4)에 식 (3)을 대입하면,

$$I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = I_o \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}\right)\right) \quad (7)$$

여기서 일반적인 상용 패널의 경우  $R_{sh} \gg R_s$  이므로,  $\exp(I_{sc} R_s / N_s V_t) \ll \exp(V_{oc} / N_s V_t)$  임을 이용하여 간략화하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = I_o \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) \quad (8)$$

여기서, 미정계수  $I_o$ 를 소거하기 위하여 광량조건이 다른 두 개의 I-V 특성곡선에 각각 식(8)을 적용하면

$$I_{sc1} - \frac{V_{oc1}}{R_{sh}} = I_o \exp\left(\frac{V_{oc1}}{N_s V_t}\right) \quad (9)$$

$$I_{sc2} - \frac{V_{oc2}}{R_{sh}} = I_o \exp\left(\frac{V_{oc2}}{N_s V_t}\right) \quad (10)$$

와 같고, (9)를 (10)으로 나누면

$$\frac{I_{sc1} - \frac{V_{oc1}}{R_{sh}}}{I_{sc2} - \frac{V_{oc2}}{R_{sh}}} = \exp\left(\frac{V_{oc1} - V_{oc2}}{N_s V_t}\right) \quad (11)$$

여기에 미지수는  $V_t$ 안의  $A$ 만이 남기 때문에, 해석적으로  $A$ 를 구할 수 있다.

$$A = \frac{1}{N_s} \frac{q}{kT} \frac{V_{oc1} - V_{oc2}}{\ln\left[\left(I_{sc1} - \frac{V_{oc1}}{R_{sh}}\right) / \left(I_{sc2} - \frac{V_{oc2}}{R_{sh}}\right)\right]} \quad (12)$$

$A$ 를 얻게 되면  $I_o$ 는 식(8)에서 구할 수 있다. 이제  $R_s$ 를 구하기 위하여 식(4)를 식(5)에 대입한다.

$$I_o \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} - I_m - I_o \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{N_s V_t}\right) = 0 \quad (13)$$

$R_{sh} \gg R_s$  임을 이용하면 다음과 같이  $R_s$ 를 얻을 수 있다.

$$R_s = \frac{N_s V_t}{I_m} \ln \left\{ \frac{I_o \exp \frac{V_{oc}}{N_s V_t} + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} - I_m}{I_o \exp \frac{V_m}{N_s V_t}} \right\} \quad (14)$$

마지막으로,  $I_{ph}$ 는 식 (3)에  $I_o$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $A$ 를 대입하여 구할 수 있다.

$$I_{ph} = I_{sc} + I_o \exp \frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t} + \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (15)$$

이리하여, 식(6),(8),(12),(14),(15)를 통하여 필요한 파라미터 5개를 모두 구할 수 있다.

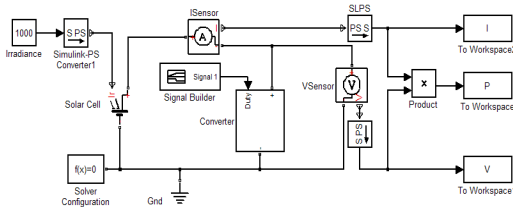
### 4. 실험 및 결과

제시한 파라미터 추출 방법의 실용성을 검증하기 위해, 상용 태양전지 패널인 Aide solar사의 XZST-170W와 Suntech사의 E19/318W 제품의 파라미터를 제시한 방법을 통하여 추출한 결과가 표 1과 같다.

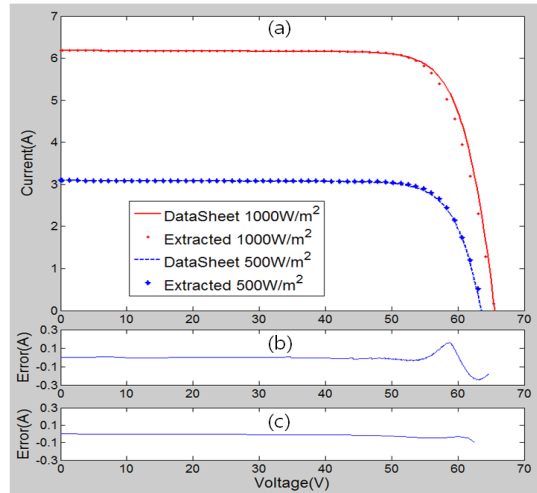
[표 1] 파라미터 추출 결과

파라미터	XZST-170W	E19/318W
$I_{ph}$	5.1689	6.1820
$I_o$	6.5391e-9	1.1721e-11
$R_s$	0.5265	0.6317
$R_{sh}$	1410.1	2785.0
$A$	1.1615	1.0744

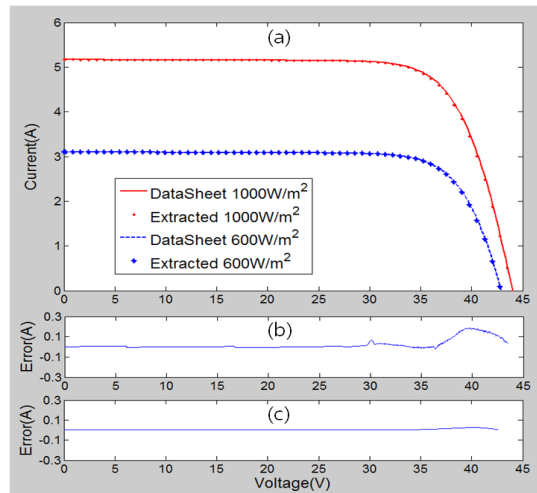
MATLAB 2010b 버전에서는 Simscape와 함께 SimElectronics 툴박스를 이용하여 태양전지 모델을 그림 4와 같이 구성할 수 있다.



[그림 4] SimElectronics를 이용한 태양전지 모델 특성 확인 회로



[그림 5] (a)추출한 모델과 E19/318W 데이터 시트의 출력 곡선 비교 (b)1000W 출력 곡선의 오차 (c)500W 출력 곡선의 오차



[그림 6] (a)추출한 모델과 XZST-170W 데이터 시트의 출력 곡선 비교 (b)1000W 출력 곡선의 오차 (c)600W 출력 곡선의 오차

추출한 파라미터 값을 Solar Cell 블록의 파라미터로 입력하고, 컨버터로 전압을 증가시키면서 태양전지의 전류 출력을 측정하였다. 이를 데이터 시트[6,7]의 그래프와 함께 그려 비교한 것이 그림 5와 그림 6이다.

제시한 파라미터 추출 방법으로 완성한 모델이 실제의 태양전지 패널과 거의 같은 특성을 보임을 알 수 있다. 따라서 사용자는 이 파라미터를 활용하거나, 추출한 파라미터를 수치해석법의 초기 값으로

입력하여 보다 정확한 파라미터의 추출에 사용할 수 있다.

## 5. 결론

태양전지 패널의 단일 다이오드 모델에서 5개 모델 파라미터를 얻는 해석적 방법을 제시하고 MATLAB을 이용하여 실험 하였다. 그 결과 태양전지 패널의 I-V 출력특성을 거의 그대로 재현하는 모델을 완성할 수 있었다. 제시된 방법은 기존의 수치해석법에 비하여 초기치 선정 문제가 없어 빠르게 결과를 얻을 수 있으며, 데이터 시트를 이용하면 측정단계를 생략할 수 있다. 제시된 방법의 활용으로 상용패널의 I-V 특성곡선들을 통한 특성 파악이 가능하다.

## 참고문헌

- [1] Chan, D.S.H. Phang J.C.H. "A Method for the Direct Measurement of Solar Cell Shunt Resistance", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-31, NO.3, March 1984
- [2] G. Araujo and E. Sanchez, "A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell", Electron Devices, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 8, pp. 483-490, 1971.
- [3] Bashahu M. and A. Hayarimana, "Review and test methods for determination of the solar cell series resistance", Renewable energy, 6, pp. 129-138, 1995
- [4] Yadir, S. Benhmida, M. Sidki, M. Assaid, E. Khaidar, M. "New method for extracting the model physical parameters of solar cells using explicit analytic solutions of current-voltage equation", Microelectronics 2009 International Conference on, Dec. 2009 . pp 390-393.
- [5] Sera Dezso, Teodorescu Remus, Pedro Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values", Industrial Electronics, ISIE 2007. IEEE International Symposium on, June2007, pp2392-2396
- [6] Aide Solar XZST-170W Data sheet
- [7] Suntech E19/318W Data sheet

### 최 성 원(Sung-Won Choi)

[준회원]



- 2010년 2월 : 전북대학교 전자공학과 (학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 전자공학부 (석사과정)

<관심분야>

신재생에너지, 예측제어, 시스템 인식

### 류 지 형(Ji-Hyung Ryu)

[정회원]



- 2005년 2월 : 전북대학교 전자정보공학부 (학사)
- 2007년 2월 : 전북대학교 대학원 전자정보공학부 (석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 전자공학부 (박사과정)

<관심분야>

이동로봇, 영상처리, 지능제어

### 이 창 구(Chang-Goo Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (학사)
- 1983년 ~ 1991년 : 한국통신연구원 선임연구원
- 1991년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (박사)
- 1992년 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 교수

<관심분야>

현대제어, 퍼지제어, 지능형 시스템