

# 태양전지 시뮬레이터를 위한 새로운 태양전지 특성 모의 방법

김정중, 민병덕\*, 이종필\*, 김태진\*, 유동욱\*, 송의호  
 창원대학교 제어계측공학과, 한국전기연구원\*

## A Novel Method of Simulation of PV Characteristic Curves for PV Simulator

Jeong Joong Kim, Byung Duk Min\*, Jong Pil Lee\*, Tea Jin Kim\*, Dong Wook Yoo\*,  
 Eui Ho Song

Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute\*(KERI)

### ABSTRACT

본 논문에서는 태양전지 시뮬레이터를 위해 새로운 태양전지 특성곡선 모의 방법을 제안한다. 태양전지 모델링의 수식은 비선형적이며 파라미터가 복잡하며, 실제 구현에서 어려움이 많다. 본 논문에서 제시한 방법은 이러한 문제점을 극복하기 위해, 태양전지 데이터북을 바탕으로 새로운 표준 시험 조건의 전류, 전압 특성 곡선과 주요 환경별 지정 데이터들을 바탕으로 데이터베이스 작업의 간소화와 프로그램 수행시간 절약이 가능한 새로운 전류, 전압 특성 곡선 추출방법을 제시하고, 새로운 방법에 대한 유효성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 1. 서론

태양광발전시스템은 신재생에너지 분야에서 각광받고 시스템이며, 관련 산업은 최근 급격한 성장 동향을 나타내고 있다.[1]

태양광발전시스템의 설비를 구축하는데 있어 태양전지를 설치할 지리적요건과 환경적인 요건 등이 요구된다. 이에 태양전지 시뮬레이터는 단위시간당 일조 강도와 주위온도에 의해 변화하는 태양전지의 특성을 안정적으로 확보하고, 설치와 운용에 관련된 단점들을 보완할 수 있으므로, 태양광발전시스템의 시험단계에 요구되는 필수장치이다.

태양전지 시뮬레이터의 전류, 전압 특성 곡선을 이전까지의 방법들은 데이터북에서 제공하는 다량의 기준 데이터들의 데이터베이스로 보간법(interpolation)을 이용하는 방법과 단위 온도와 광량에 대한 변화계수를 이용하여 제어하는 방법이다.

본 논문에서는 PV simulator를 I-V 특성곡선으로부터 출력 동작 전류( $I_{Pmax}$ )를 제어하기 위해, 표준 시험조건(Standard Test Conditions, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, 이하 STC)의 전류, 전압 특성 곡선과 주요 요소별 광량과 주위온도별 단락 전류와 개방 전압값을 바탕으로, 태양전지 시뮬레이터의 출력 전압으로부터 주변 환경에 맞는 태양전지 시뮬레이터의 출력전류를 추출하는 방법에 대하여 제시하였다.

### 2. 태양전지 모델링 및 시뮬레이터의 구성

태양전지의 간단한 등가회로는 다이오드와 전원이 병렬로 연결되어진 구조이다. 전류원은 태양의 광량(irradiance, E)에

직접 비례하는 광전류( $I_{PV}$ )를 발생시킨다. 태양전지는 p-n 접합 다이오드로 등가적으로 표현이 가능하다.

식 (1)은 간단한 등가회로로부터 태양전지의 전류전압 특성 곡선을 Kirchhoff' Current Law 에 의해서 표현한 수식이다.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \times \left\{ \left( \exp\left(\frac{V}{m \times V_T}\right) - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

여기서,

$I_{ph}$  : photo current                       $I_D$  : diode current  
 $I_s$  : diode reverse saturation current  
 $m$  : diode 'ideally factor'       $k$  : constant of boltzmann  
 $V_T = \frac{kT}{e}$ ,       $V_T = 25.7$  mV at 25 °C  
 $T$  : absolute temperature       $e$  : charge of an electron

그림 1은 태양전지 시뮬레이터의 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 그림 1의 구성 요소 중 태양전지 특성곡선 추출 방법에 관한 내용으로, 주요 동작은 다음과 같다.

태양전지 시뮬레이터의 입력요소로는 광량, 주위온도의 입력과 PV simulator의 출력전압( $V_{FD}$ )을 선정한다.

입력된 광량( $Irr$ ), 주위온도( $T$ )와 출력전압은 본 논문에서 제안하는 추출방법을 거쳐 전류 지령치( $I^*$ )를 출력하게 되고, 전류 지령치( $I^*$ )는 PV simulator의 출력 전류 값과 비교하여 PWM 신호로 전력변환장치에 전달된 후, I-V 특성곡선에 해당되는 출력 전류( $I_{Pmax}$ )를 출력하게 된다. 이때, 태양전지 시뮬레이터의 입력은 자연 상태의 광량, 온도와 실제 출력전압을 입력으로 받을 수 있고, 사용자에게 의해 인위적으로 정해진 상황의 값들을 입력으로 받을 수 있다.

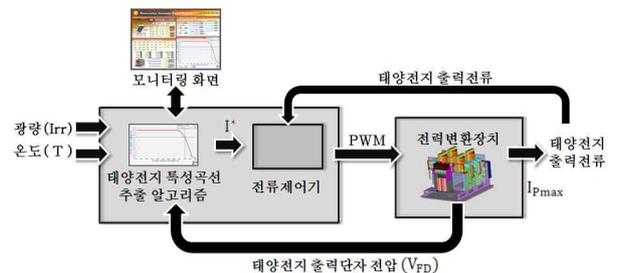


그림 1 PV simulator 의 시스템 구성도  
 Fig. 1 Block Diagram of Photovoltaic Simulator

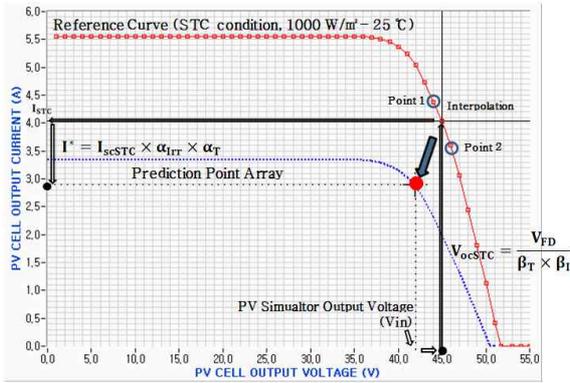


그림 2 제안한 PV simulator의 전류, 전압 특성 곡선의 추출방법  
Fig. 2 New Method of current-Voltage Curves for PV simulator operation

그림 2는 본 논문에서 제안한 PV Simulator 구동 알고리즘을 그림으로 표현한 것이다. PV Simulator의 출력전압을 피드백 받아, 해당 피드백 전압을 전압 변환계수를 이용하여 STC 기준의 전압으로 변환하고, 변환된 전압에 해당되는 출력전류를 보간법을 이용하여 추출하게 된다. 추출된 전류는 STC 기준의 전류이므로, 이를 전류변환계수를 이용하여 광량과 주위온도에 대한 출력전류로 출력하게 된다.

### 3. 새로운 태양전지 특성 곡선 모의 추출방법

태양전지 시뮬레이터를 제어하는 보편적인 방법은 식 (1)과 같은 수식을 통하여 특성곡선을 생성하는 방법[2]과 수많은 실험을 통한 다량의 특성곡선을 데이터베이스를 가지는 방법, 광량과 주위온도에 대한 관계수를 찾는 방법[3], 해당하는 새로운 I-V 특성곡선을 생성하는 방법[4]등 다양한 방법들이 제시되고 있다.

식 (1)에서 나타나듯이 일반적인 태양전지 특성곡선에 대한 수식은 기본적으로 지수함수를 포함한 비선형적인 특성곡선식으로 필요한 파라미터의 개수가 많음을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 이러한 내부 변수는 태양전지 제조업체에서 제공하지 않는 것이 일반적이므로, 정확한 모의는 힘든 실정이다. 또한, 이를 태양전지 모의 장치에서 구현하기에는 수식이 복잡하여, 마이크로프로세서에서 구현하기에는 시간상으로 부족한 면이 있어 고성능의 마이크로프로세서가 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서 제안한 새로운 전류, 전압 특성 곡선의 추출방법은 표준 시험조건(광량 1000 W/m<sup>2</sup>, 주위온도 25 °C)의 전류, 전압 특성곡선 데이터와 주요 구간별로 획득한 광량과 주위온도의 단락전류(이하,  $I_{sc}$ ), 개방전압(이하,  $V_{oc}$ )값을 수집하여야 한다.

표 1 Sanyo사의 모델로부터 추출한 광량과 주위온도 데이터  
Table 1 Data of Solar Cell Datasheet,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$

irradiance (W/m <sup>2</sup> )	온도 25 °C 기준		temp (°C)	광량 1000 W/m <sup>2</sup> 기준	
	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)		$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)
1000	5.554	51.62	75	5.61	45.3
800	4.451	51.17	50	5.57	48.4
600	3.335	50.47	25	5.554	51.62
400	2.232	49.52	0	5.51	55
200	1.118	48.11	Model : HIP-215NHE5, Sanyo		

피드백 받는 출력전압( $V_{FD}$ )은 주변의 환경요소에 의해 출력된 값으로서, 기준 곡선의 데이터와의 비교를 위하여 기준 곡선 기준의 데이터로 변환하는 과정을 처음으로 진행한다. 광량과 온도는 서로에 대하여 독립적이므로, 식 (2)을 통하여 온도의 차이( $T - T_L$ ), 광량에 대한 차이( $I_{rr} - I_{rrL}$ )를 기준 곡선의 개방 전압과의 성분비로  $V_{FD}$ 와 연산한다. 연산과정의 결과는 기준곡선의 개방전압( $V_{ocSTC}$ )이 된다.

피드백 전압의 기준곡선으로의 특정  $V_{oc}$  값( $V_{ocSTC}$ )은,

$$V_{ocSTC} = \frac{V_{FD}}{\beta_T \times \beta_I} \quad (2)$$

여기서, 식 (2)의  $\beta_T$ ,  $\beta_I$ 는 광량과 주위온도의 전압변환계수이며, 식 (3)을 통하여 값을 얻을 수 있다.

$$\beta_I = \frac{V_{ocNIrr}}{V_{oc, 1000, 25^\circ C}}, \quad \beta_T = \frac{V_{ocNT}}{V_{oc, 1000, 25^\circ C}} \quad (3)$$

여기서,

- $V_{ocNIrr}$  : 주위 광량에 대한 새로운  $V_{oc}$
- $V_{ocNT}$  : 주위 온도에 대한 새로운  $V_{oc}$
- $V_{oc, 1000, 25^\circ C}$  : 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C에서의  $V_{oc}$

식 (3)의  $V_{ocNIrr}$ ,  $V_{ocNT}$ 는,

$$V_{ocNIrr} = V_{ocIrrL} - \frac{I_{rr} - I_{rrL}}{I_{rrH} - I_{rrL}} (V_{ocIrrL} - V_{ocIrrH}) \quad (4)$$

$$V_{ocNT} = V_{ocTL} - \frac{T - T_L}{T_H - T_L} (V_{ocTL} - V_{ocTH}) \quad (5)$$

위의 과정으로 얻어진  $V_{ocSTC}$ 는 기준곡선의 데이터와 비교하여 최소차의 근사값 2개와 선형보간법(linear interpolation)을 통하여  $I_{scSTC}$ 의 값을 얻을 수 있다. 만약, STC 조건에서 피드백 되는 출력전압 값이  $V_{ocSTC}$ 일 때, 출력전류 지령치  $I^*$ 는  $I_{scSTC}$ 가 된다.

주변 조건에 맞는  $I_{scSTC}$ 는 식 (6)을 통하여 추출이 가능하고, 이때의  $I_{scSTC}$ 는 태양전지 시뮬레이터의 주변조건과 피드백 되는 개방전  $V_{FD}$ 일 때, 태양전지 I-V 특성을 만족하는 최종  $I^*$ 이다.

피드백 개방전압 대한 새로운  $I_{sc}$ (출력전류 지령치  $I^*$ )는,

$$I^* = I_{scSTC} \times \alpha_{Irr} \times \alpha_T \quad (6)$$

여기서, 식 (6)의  $\alpha_{Irr}$ ,  $\alpha_T$ 는 광량과 주위온도의 전압변환계수이며, 식 (7)을 통하여 값을 얻을 수 있다.

$$\alpha_{Irr} = \frac{I_{scNIrr}}{I_{sc, 1000, 25^\circ C}}, \quad \alpha_T = \frac{I_{scNT}}{I_{sc, 1000, 25^\circ C}} \quad (7)$$

여기서,

- $I_{scNIrr}$  : 주위 광량에 대한 새로운  $I_{sc}$
- $I_{scNT}$  : 주위 온도에 대한 새로운  $I_{sc}$
- $I_{sc, 1000, 25^\circ C}$  : 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C에서의  $I_{sc}$

식 (7)의  $I_{scNIrr}$ ,  $I_{scNT}$ 는

$$I_{scNrr} = I_{scIrrL} - \frac{I_{rr} - I_{rrL}}{I_{rrH} - I_{rrL}} (I_{scIrrL} - I_{scIrrH}) \quad (8)$$

$$I_{scNT} = I_{scTL} - \frac{T - T_L}{T_H - T_L} (I_{scTL} - I_{scTH}) \quad (9)$$

식 (2) ~ (9)의 과정으로부터 광량과 주위온도에 대한 피드백 전압값  $V_{FD}$ 로부터 모든 영역에서 태양전지의 I-V 특성을 가지는 출력전류 지정치( $I^*$ )를 획득 할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 PV simulator의 전류, 전압 특성곡선 추출방법의 타당성을 증명하기 위하여 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 입력 광량은 550 W/m<sup>2</sup>, 입력주위온도는 52 °C, PV Simulator의  $V_{FD}$ 를 38.15 V라 가정하였을 때의 연산결과를 나타내고 있는 것이다. Reference curve는 STC의 기준 곡선, Input Parameter curve 는 예제 환경에서의 기준곡선을 나타내고 있으며, 상수 값은 제안한 방법의 주요 지점별 값을 표현한 것이다. 표 3은 제안한 방법의 연산과정에 필요한 주요 값들을 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과 값의 정밀도는 데이터베이스에서 제공하는 다른 기준곡선과 비교해 본 결과, 전압의 최대오차는 0.01%, 전류의 최대오차는 0.012%를 나타내었다.

결론적으로, 제안한 PV Simulator의 특성 곡선 추출방법은 기존의 제어방법과 비교하여 간단한 수식으로 구성되어, 프로그램으로의 구현이 쉽고, 데이터베이스에 들어갈 데이터양도 현저히 줄어들어 작업량이 줄어들게 된다.

표 2 예제를 통한 제안한 방법의 연산과정  
Table 2 Result of calculation through method for Example of Algorithm

조건 - 광량 : 550 W/m <sup>2</sup> , 주위온도 : 52 °C, $V_{FD}$ : 38.15 V					
변수	값	변수	값	변수	값
$T_H$	75 °C	$V_{ocTH}$	45.3 V	$I_{rrH}$	600 W/m <sup>2</sup>
$T_L$	50 °C	$V_{ocTL}$	48.4 V	$I_{rrL}$	400 W/m <sup>2</sup>
$V_{ocIH}$	50.47 V	$I_{scTH}$	5.61 A	Point 1	( 43 , 4.736 )
$V_{ocIL}$	49.52 V	$I_{scTL}$	5.57 A	Point 2	( 42 , 5.042 )
$I_{scIH}$	3.335 A	$I_{scIL}$	2.232 A	$I_{scSTC}$	5.03511 A
변수	전 개 식				값
$V_{ocNI}$	$49.52 - \left\{ \left( \frac{550 - 400}{600 - 400} \right) \times (49.52 - 50.47) \right\}$				50.2325 V
$V_{ocNT}$	$48.4 - \left\{ \left( \frac{52 - 50}{75 - 50} \right) \times (48.4 - 45.3) \right\}$				48.152 V
$I_{scNI}$	$2.232 - \left\{ \left( \frac{550 - 400}{600 - 400} \right) \times (2.232 - 3.335) \right\}$				3.05925 A
$I_{scNT}$	$5.57 - \left\{ \left( \frac{52 - 50}{75 - 50} \right) \times (5.57 - 5.61) \right\}$				5.5732 A
$\beta_I$	48.152 ÷ 51.62				0.9328
$\beta_T$	50.2325 ÷ 51.62				0.9732
$\alpha_I$	3.05925 ÷ 5.554				0.55081
$\alpha_T$	5.5732 ÷ 5.554				1.00034
$V_{ocSTC}$	38.15 ÷ 0.9328 ÷ 0.9732				42.0273 V
$I^*$	5.03511 × 0.55081 × 1.00034				2.774 A

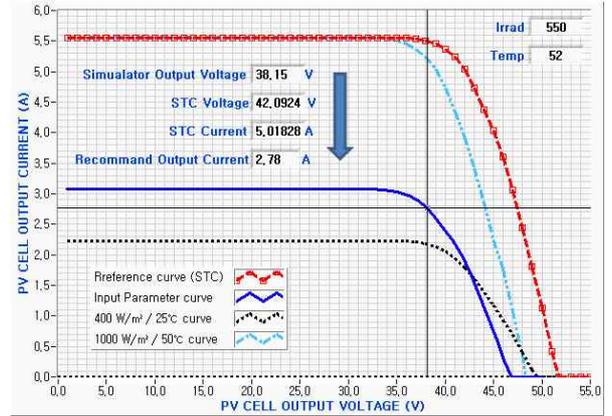


그림 3 시뮬레이션 중간값 및 결과  
Fig. 3 Result of Simulation of New Algorithm

#### 5. 결 론

본 논문에서는 태양전지 시뮬레이터의 운용을 목적으로 기존의 복잡한 수식과 다량의 태양전지의 데이터를 확보하는 방법 등의 단점을 보완하고자, STC 조건의 전류-전압 특성곡선 데이터와 광량과 주위 온도의 주요구간별  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  값을 획득하고, 관련 계수들을 바탕으로 새롭게 제어방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 제어방법은 기존의 복잡한 수식연산이 주요 요소간의 관계로 간단하게 표현되며, 이로 인하여 마이크로프로세서로 구현하기가 간단하게 된다. 또한, 특성곡선의 데이터베이스 작업량이 현저히 줄어들게 되어, 프로세서의 메모리 용량을 작게 차지하는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 데이터의 추출이 단순적이지 않고, 광량과 주위온도의 모든 동작영역에서 연속으로 추출이 가능하다는 장점이 있다.

시뮬레이션 결과에서는 아주 작은 오차로 제어방법의 타당성을 입증하게 되었으며, STC 특성곡선 데이터 개수를 세밀하게 확보할 경우에는 출력의 오차 범위가 더욱 작아진다.

향후 연구방향으로는 더욱 신속하고 정확한 제어를 위하여, 새로운 방법의 제어방법 연구 및 태양전지 시뮬레이터(PV Simulator)에 적용한 실증 연구가 필요할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Keiko Unzalu, " Capacity and market Potential for grid-connected system by 2010", EPIA workshop Dec 2005.
- [2] Mrig L., DeBlasio R., O'Sullivan G. A., Tomko T. "An advanced PV system simulator to demonstrate the performance of advanced PV cells and Devices", Proceeding of 16th IEEE PV Specialists Conference, San Diego, pp. 199-204, 1982
- [3] David L. King, Jay A. Kratochvil, and E. Boyson "Temperature coefficients for PV modules and array : Measurement methods, difficulties, and results" 26th PVSC, Anaheim, CA, 1997
- [4] 이병인, 류태규, 한정만, 최규하, "태양전지 가상구현 장치를 위한 새로운 태양전지 모델링에 관한 연구" 추계전력전자학술대회 논문집, 2002