

# 전기적등가회로 해석에 의한 PV cell modeling

박현아\*, 김효성\*†, 김광섭\*\*

공주대학교 전기전자제어공학부\*, 카코뉴에너지(주)

## PV Cell Modeling by Electrical Equivalent Circuit

Hyeonah Park\*, Hyosung Kim\*†, Kwangseob Kim\*\*

School of EE and Control Engineering, Kongju National University\*, KACO new energy Inc.\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 PV cell의 전기적 등가회로에 대하여 테브난 노턴 분석방법을 통하여 3개의 대표적인 운전점에서 I-V 특성곡선의 접선의 기울기를  $R_s$ 와  $R_{sh}$  및  $R_{MPP}$ 에 관련되는 값으로써 정량적으로 구하는 방법을 제시한다. 이 값들은 PV cell의 전류방정식에서 발생하는 4원 1차 연립방정식의 경계조건은 만족함으로써 전기적 등가회로의 4가지 요소에 대한 값을 구할 수 있는 길이 열린다. 제안된 방법은 제조사가 datasheet에서 특성을 보장하는 초기 PV cell 제품에 대한 I-V 특성뿐만 아니라, 열화가 진행된 PV cell의 실제적인 I-V 특성을 정확히 시뮬레이션 할 수 있다는 장점이 있다.

### 1. 서론

PV cell은 전기적으로 다이오드상수( $I_0$ ,  $v_t$ )와 광전류값( $I_{ph}$ ), 그리고 직렬저항( $R_s$ )과 선타저항( $R_{sh}$ )의 5개 요소로 모델이 가능하다. PV cell modeling을 할 경우 광전류값은 일사량에 비례하여 그 값을 추정할 수 있는 반면, 나머지 4개 요소인  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $v_t$ 의 경우 제조사에서 제공하는 datasheet의 3 운전점(단락운전, 개방운전 및 최대출력운전)에서의 접선의 기울기 및 전류 전압 값을 토대로 값을 도출하여야 한다. 이를 위하여 4원 1차 연립방정식의 수립이 요구되며, 3 운전점에서의 경계조건을 찾아야 한다. 본 논문에서는 테브난 노턴 등가회로 해석법을 기초로 하여 임의의 PV cell에 대한 3 운전점에서의 경계조건을 구하는 방법을 제시하고, 이를 바탕으로 PV cell 등가회로 요소값을 도출하는 방법을 제안한다.

### 2. 전기적등가회로 분석

#### 2.1 I-V 특성방정식에 따른 접선의 기울기

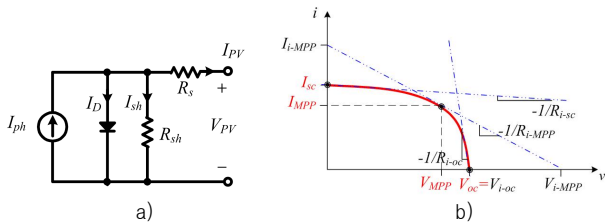


그림 1 a) PV cell의 단일 등가회로, b) I-V & P-V 특성곡선

PV cell modeling을 하기 위한 PV cell 등가회로와 특성곡선은 그림 1과 같으며, 등가회로를 기반으로 한 PV cell의 전류 특성방정식은 식 (1)과 같다.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{n_s v_t}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$I_{ph}$ : Current generated by the incident light  
 $I_0$ : Diode saturation current  
 $R_{sh}$ : Cell parallel(shunt) resistance,  $R_s$ : Cell series resistance  
 $n_s$ : Number of PV cells connected in series  
 $v_t$ : Ideal unit Cell thermal voltage ( $akT/q$ )  
 $a$ : diode quality (ideality) factor  
 $k$ : Boltzmann's constant ( $1.381 \times 10^{-23}$ )  
 $q$ : Charge of the electron ( $1.602 \times 10^{-19}$ )  
 $T$ : Kelvin Temperature at standard test condition (25+273.15)

식 (1)에서 단락회로 운전점 및 최대전력 운전점에서 전류 특성방정식의 접선의 기울기를 나타내면 식 (2) 및 식 (3)과 같다.<sup>[1]</sup>

$$\left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=0, I_{PV}=I_{sc}} = \frac{- \left[ \frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]}{1 + R_s \left[ \frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]} \quad (2)$$

$$\left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=V_{MPP}, I_{PV}=I_{MPP}} = \frac{- \left[ \frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]}{1 + R_s \left[ \frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]} \quad (3)$$

#### 2.2 전기적등가회로에 따른 단락운전 경계조건

그림 1a)의 PV cell 등가회로를 단락회로 운전점인  $V_{PV}=0$ ,  $I_{PV}=I_{sc}$ 에서 보면 그림 2a)와 같게 된다. 여기서 다이오드의 증분저항(incremental resistance)  $R_{D-sc}$ 은 식 (5)와 같이 단락 운전조건에서 다이오드전압을 다이오드전류로 미분하여 구한다.

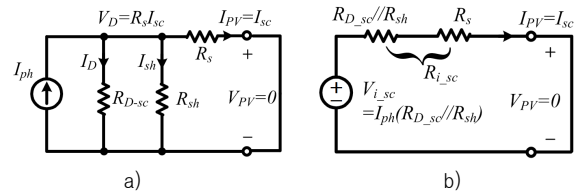


그림 2 단락회로 운전점에서의 기울기(등가회로 물리적 분석)

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{n_s v_t}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_{D-sc}} = \left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_{V_D=I_{sc}R_s} = \frac{R_s}{R_{sh}(R_{sh} - R_s)} \quad (5)$$

단,  $R_{D-sc}$ : diode incremental resistance at Short Circuit.

$$R_{i-sc} = R_{D-sc} // R_{sh} + R_s = R_{sh} \quad (6)$$

테브난 노턴 등가회로 해석법에 의해 PV cell 등가회로는 그림 2b)와 같이 볼 수 있으며, 단락회로 운전점에서 I-V 특성곡선의 접선의 기울기는 식 (6)의 테브난저항과 같은 값인  $R_{sh}$ 이 된다. 여기서 구한 경계조건을 식 (2)를 적용하여  $v_t$ 에 관해 전개하면 식 (7)과 같다.

$$v_t = \frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s \ln \left[ \frac{n_s v_t R_s}{(I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc})(R_{sh} - R_s)} \right]} \quad (7)$$

### 2.3 전기적 등가회로에 따른 최대전력운전 경계조건

최대전력 운전조건인  $V_{PV} = V_{MPP}$ ,  $I_{PV} = I_{MPP}$ 에서 PV cell의 전기적 등가회로는 그림 3a)와 같이 된다.

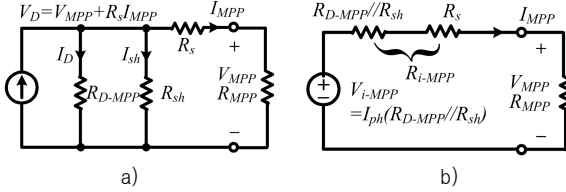


그림 3 최대전력 운전점에서의 기울기(등가회로 물리적 분석)

마찬가지로 다이오드의 증분저항(incremental resistance)  $R_{D-MPP}$ 은 식 (8)과 같이 최대전력 운전조건에서 다이오드전압을 다이오드전류로 미분하여 구한다.

$$R_{D-MPP} = \frac{dI_D}{dV_D} \Big|_{V_D = V_{MPP} + R_s I_{MPP}} = \frac{R_{sh} + R_s - R_{MPP}}{R_{sh}(R_{MPP} - R_s)} \quad (8)$$

$$\text{단 } R_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}}$$

$R_{D-MPP}$ : diode incremental resistance at MPP.

$$R_{i-MPP} = R_{D-MPP}/R_{sh} + R_s = R_{MPP} \quad (9)$$

따라서 최대전력 운전점에서 I-V 특성곡선의 접선의 기울기는 식 (9)에서 계산한 것처럼 그림 3b)의 테브난저항과 같은 값인  $R_{MPP}$ 가 된다. 이 경계조건을 식 (3)에 적용하여  $v_t$ 에 관해 전개하면 식 (10)과 같다.

$$v_t = \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s \ln \left[ \frac{n_s v_t (R_{sh} + R_s - R_{MPP})}{(I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc})(R_{MPP} - R_s)} \right]} \quad (10)$$

### 2.4 그 외의 방정식

식 (1)에 개방회로 운전조건인  $V_{PV} = V_{oc}$ ,  $I_{PV} = 0$ 을 적용하여  $I_{ph}$ 에 관해 정리하면 식 (11)과 같다.

$$I_{ph} = I_0 \left( e^{\frac{V_{oc}}{n_s v_t}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (11)$$

식 (1)에 단락회로 운전조건인  $V_{PV} = 0$ ,  $I_{PV} = I_{sc}$ 를 적용한 뒤, 식 (11)을 대입하면 식 (12)와 같이  $I_0$ 에 관련한 방정식이 수립된다.

$$I_0 = \frac{I_{sc}(R_{sh} - R_s) - V_{oc}}{R_{sh}} e^{-\frac{V_{oc}}{n_s v_t}} \quad (12)$$

한편, 식 (1)에 식 (11), 식 (12)를 대입하여 최대전력 운전조건인  $V_{PV} = V_{MPP}$ ,  $I_{PV} = I_{MPP}$ 를 적용하면 식 (13)과 같이  $R_{sh}$ 에 관련한 방정식이 수립된다.

$$R_{sh} = \frac{(I_{sc} - I_{MPP})R_s^2 + (n_s v_t - I_{sc}I_{MPP})R_s + R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t)}{(I_{MPP} - I_{sc})R_s + I_{sc}R_{MPP} - V_{MPP} - n_s v_t} \quad (13)$$

## 3. 파라미터 추출 방법

이상과 같이 PV cell 등가회로의 해를 구하기 위하여 필요한 연립방정식은 4개이어야 하지만 수립된 연립방정식은 3개이므로 반복법에 의하여 파라미터의 해를 찾아야 한다. 본 논문에서는  $R_s$ 를 작은 스텝으로 증가시켜가면서 4개 파라미터를 추출하는 방법을 그림 4에 플로우차트로 제시한다.

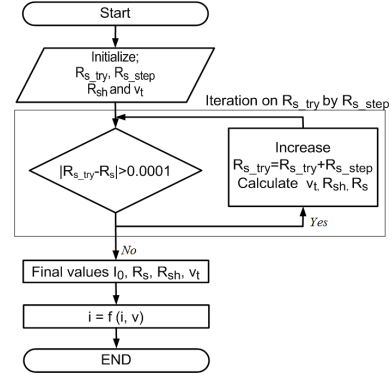


그림 4 파라미터추출 플로우 차트

$$v_t = \frac{1.25kT}{q} \quad (14)$$

$$R_s = \frac{A(R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t) - BD)}{CD + B(I_{MPP} - I_{sc}) - A(n_s v_t - I_{sc}R_{MPP})} \quad (15)$$

$$A = I_{MPP} - I_{sc} - I_{sc} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \quad B = -V_{MPP} + \frac{n_s v_t I_{MPP} V_{oc}}{I_{sc} V_{MPP}}$$

$$C = I_{sc} - I_{MPP} - \frac{n_s v_t I_{MPP}}{V_{MPP}} \quad D = I_{sc} R_{MPP} - V_{MPP} - n_s v_t$$

식 (14)를 적용하여  $v_t$ 의 초기값 설정을 한 뒤, 반복루틴에서  $R_{s\_try}$  값을 작은  $R_{s\_step}$  만큼씩 증가시켜가며  $R_{sh}$ ,  $v_t$ 의 값을 중속적으로 계산하고,  $R_{s\_try}$ 와 식 (15)에서 구한  $R_s$ 차이의 크기가 0.0001보다 작아지면 반복을 종료한다.

## 4. 결론

본 논문에서는 PV cell modeling에 필요한 4개 연립방정식을 도출하기 위하여 테브난 노턴 분석방법을 통하여 전기적 등가회로에 따른 단락운전과 최대전력운전에서 경계조건을 구하였다. 또한 I-V 특성곡선에서 3개의 대표적인 운전점인  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{MPP}$ 에서 접선의 기울기와 datasheet의 파라미터를 이용하여 전기적 등가회로의 파라미터인  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $v_t$  값을 도출하는 수식을 전개 하였다. 이렇게 구한 PV cell 모델은 초기 PV cell의 전기적 출력뿐만 아니라 열화가 진행된 PV cell의 전기적 출력을 정확히 예측하는데 기여할 것이다.

이 논문은 카코뉴에너지의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

[1] Hyeonah Park, Hyosung Kim, "Mathematical Consideration on PV Cell Modeling", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No.1, pp. 51 - 56, 2014, 01.