

PV cell modeling의 수학적 고찰

박현아, 김효성

공주대학교 전기전자제어공학부

Mathematical Consideration on PV Cell Modeling

Hyeonah Park, Hyosung Kim

School of EE and control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

PV cell model은 PV simulator를 제작하거나 시뮬레이션 Software를 통하여 PV 발전시스템을 분석하기 위하여 필요하다^[1]. PV cell의 I V 특성곡선은 PV cell의 특성을 결정짓는 중요한 요소이며, 전기적으로 다이오드정수(I_0 , v_t)와 광전류원(I_{ph}) 그리고 직렬저항(R_s) 및 션트저항(R_{sh})으로 모델링 가능하다. 광전류원은 일사량에 비례하여 그 값을 추정할 수 있으나 나머지 변수인 다이오드정수(I_0 , v_t)와 직렬저항(R_s) 및 션트저항(R_{sh})은 제조사 데이터시트에서 제공하는 3개의 대표적인 운전점인 개방회로 전압(V_{oc}), 단락회로 전류(I_{sc}), 그리고 최대출력에서의 전압/전류(V_{MPP}/I_{MPP})를 기초로 수학적으로 해를 구하여야만 한다. 본 논문에서는 저자가 제안하는 K 알고리즘의 수학적 도출 과정과 수치해석적 특성을 고찰한다.

1. 서론

반도체를 사용한 PV cell에는 결정형, 박막형 및 두 종류를 조합한 탠덤형 등 다양한 종류가 있으며 각 종류의 PV cell은 고유한 I V 특성을 갖는다. 본 논문은 임의의 재질을 갖는 PV cell에 대하여 오차와 컴퓨팅시간이 작은 PV cell modeling 방법을 제시한다. 제안된 알고리즘의 수학적 도출 과정을 설명하고, 반복계산에 의한 해의 도출방법을 제안한다. 제안된 모델링 알고리즘과 기존 선행 연구의 모델링 알고리즘에 대하여 수치해석적 차이점을 비교 분석하고, 우수한 성능을 갖는 모델링 알고리즘을 제시한다. 제조사에서 제공하는 특성곡선과 제안된 모델링 알고리즘 및 기존의 모델링 알고리즘에 따른 특성곡선을 비교하여 제안된 알고리즘의 우수성을 증명한다.

2. PV cell 모델링

2.1 제안하는 PV cell 모델링의 수식유도

PV cell 등가회로의 출력단자전류를 $i=f(i, v)$ 의 함수라고 할 때, PV cell 세가지 주요 운전점(I_{sc} , V_{oc} , P_{MPP})에서의 I V 특성곡선의 접선기울기를 토대로 등가모델의 파라미터를 구할 수 있다.

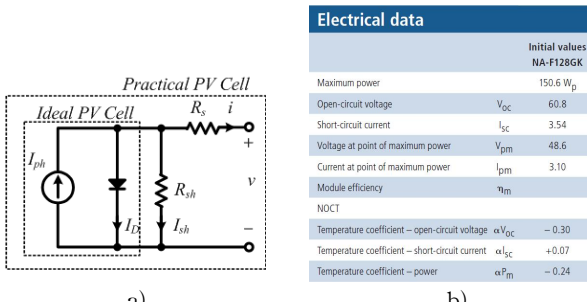


그림 1 a) PV cell의 다이오드 등가모델, b) 제조사의 데이터시트

$$\frac{\partial f(i, v)}{\partial v} = -\frac{1}{R_{sh}} + \left(\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \left(\frac{1}{n_s v_t} \right) e^{\frac{v + iR_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial f(i, v)}{\partial i} = -\frac{R_s}{R_{sh}} + \left(\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \left(\frac{R_s}{n_s v_t} \right) e^{\frac{v + iR_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \quad (2)$$

단락회로 운전점 및 최대전력 운전점에서 I V 특성곡선의 접선 기울기를 나타내면 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$\left. \frac{di}{dv} \right|_{\substack{v=0 \\ i=I_{sc}}} = \frac{-\left[\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]}{1 + R_s \left[\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$\left. \frac{di}{dv} \right|_{\substack{v=V_{MPP} \\ i=I_{MPP}}} = \frac{-\left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]}{1 + R_s \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]} = -\frac{1}{R_{MPP}} \quad (4)$$

식 (3)에 의해 v_t 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_t = \frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s \ln \left[\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{(I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc})(R_{sh} - R_s)} \right]} \quad (5)$$

$$v_t = \frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s \ln \left[\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{(I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc})(R_{sh} - R_s)} \right]} + R_s \times K_s \quad (6)$$

(단, K_s 는 0.5일 때 최적)

식 (4)에 의해 v_t , R_{sh} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$R_{sh} = \frac{(I_{sc} - I_{MPP})R_s^2 + (n_s v_t - I_{sc}I_{MPP})R_s + R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t)}{(I_{MPP} - I_{sc})R_s + I_{sc}R_{MPP} - V_{MPP} - n_s v_t} \quad (8)$$

$$\therefore I_0 = \frac{I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}}{R_{sh} \left(e^{\frac{V_{oc}}{n_s v_t}} - e^{\frac{I_{sc}R_s}{n_s v_t}} \right)} \quad (9)$$

$$R_s = \frac{A(R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t)) - BD}{CD + B(I_{MPP} - I_{sc}) - A(n_s v_t - I_{sc}R_{MPP})} \quad (10)$$

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

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

2.2 제안하는 PV cell 모델링의 파라미터 추출방법

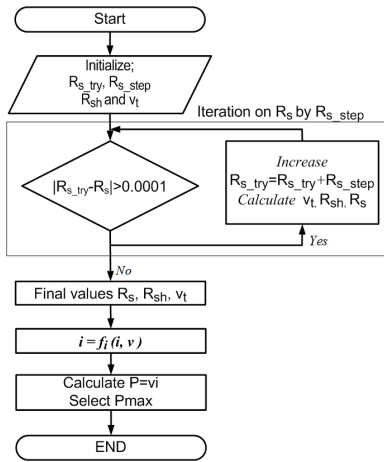


그림 2 K-알고리즘 파라미터 추출 flow chart

그림 2는 제안하는 K 알고리즘의 파라미터 추출을 위한 flow chart를 보인다. 반복루틴에서 R_{s_try} 는 R_{s_step} 만큼씩 증가하며 그에 따라 R_{sh} , v_t 의 값이 종속적으로 계산된다. R_{s_try} 와 R_s 차이의 절대 값이 0.0001 이하인 경우 R_s 의 값을 찾는 것으로 간주하여 반복루틴을 종료한다. v_t 의 수식정의에 따라 식 (5)를 K1 알고리즘, 식 (6)을 K2 알고리즘, 식 (7)을 K3 알고리즘이라고 이름한다.

2.2 제안하는 알고리즘의 수치해석적 특징

그림 3은 결정형, 박막형의 두 가지 다른 종류의 PV cell에 대하여 제안된 K 알고리즘을 사용한 등가회로 모델의 수치해석적 수렴과정을 보인다. K3알고리즘의 경우 수렴과정이 가장 빠르며 결정형과 박막형에 대해 비교적 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

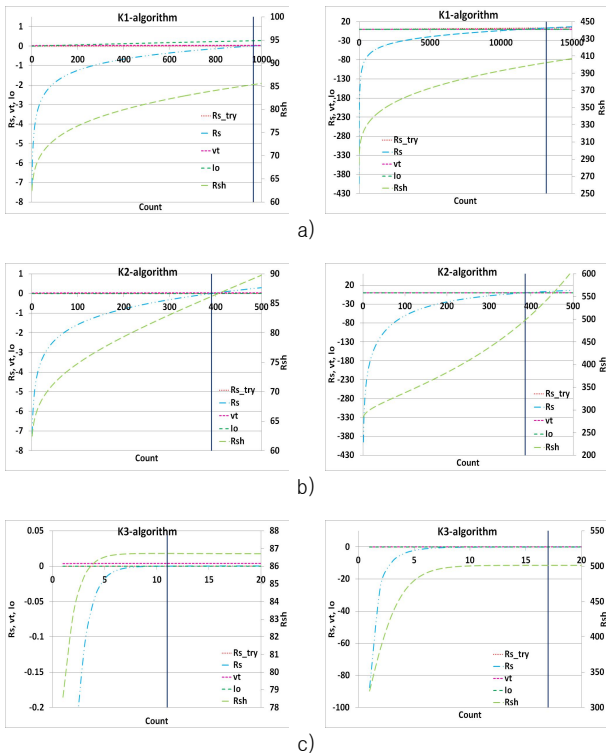


그림 3 AT50(결정형, 좌) 및 K54(박막형, 우)에 대한 파라미터의 수치해석적 특징; a) K1-알고리즘, b) K2- 알고리즘, c) K3-알고리즘

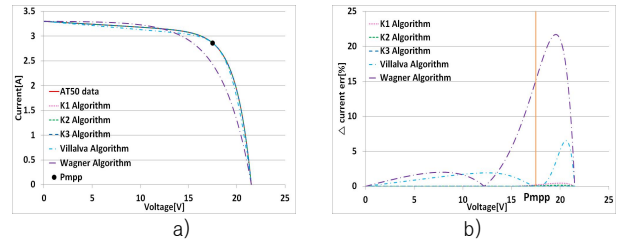


그림 4 AT50(결정형)에 대한 모델링 결과; a) I-V 특성곡선, b) Current error integral

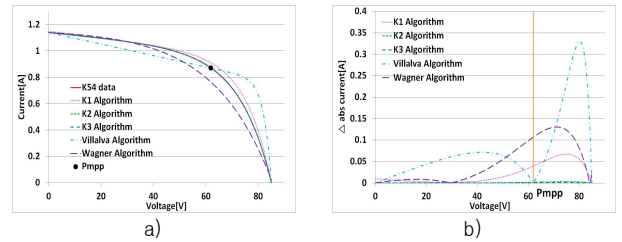


그림 5 K54(박막형)에 대한 모델링 결과; a) I-V 특성곡선, b) Current error integral

표 1 각 PV cell의 모델링 오차 비교

알고리즘	AT50(Cr-Si)		K54(thin-film)	
	반복횟수	오차적분	반복횟수	오차적분
K1 알고리즘	964	0.52	13194	4.568
K2 알고리즘	391	0.201	386	0.209
K3 알고리즘	11	0.071	17	0.085
Villalva 알고리즘	3524	0.013	5000**	3.646
Wagner 알고리즘	1	14.429	1	12.354

* 적분 범위: 최대전력운전범위(EN50530 규정), $V=0.9 \sim 1.1 \times V_{MPP}$
 **: Villalva 알고리즘의 경우 5000회 예에서 수렴하지 않음

그림 4 및 그림 5는 제안된 모델링 알고리즘과 기존의 모델링 알고리즘에 의한 특성곡선을 제조사 데이터시트의 특성곡선을 기준으로 비교한 것이며, 표 1은 제시된 각 알고리즘에서 수치해석적 반복회수와 EN50530규정에 명시된 최대전력운전범위인 $V_{MPP} \pm 10\%$ 에서의 오차적분을 비교한 결과를 보인다[2].

제안하는 K 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 등가모델 파라미터를 구하기 위한 반복 횟수와 오차가 적게 나타남을 알 수 있다. 결론적으로, K3 알고리즘이 반복회수와 오차적분의 측면에서 종합적으로 가장 우수함을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 PV cell의 등가모델을 구하기 위한 방정식을 수렴하였으며 반복계산에 의하여 파라미터를 구하는 K알고리즘을 제시하고 수치해석적 특징을 분석하였다. 제안된 K알고리즘은 기존의 알고리즘과 달리 외부에서 다이오드 정수(v_t)를 조작하여 줄 필요가 없이 다양한 종류의 PV cell에 대하여 자동적으로 파라미터를 찾으며, 적은 반복회수로도 가장 적은 오차가 발생하였고 EN50530에 규정되어있는 최대전력운전범위에서도 오차가 가장 적게 나타남을 확인할 수 있었다. 더욱이 오차목표를 낮추면 더욱 정밀한 모델링이 가능하다.

이 논문은 카코뉴에너지의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Brochure, Elgar TerraSAS: Programmable Solar Array Simulator, AMETEK Programmable Power Co. 5, pp. 1198 1208 2009.
- [2] IEC EN50530 Standard for Overall efficiency of photovoltaic inverters, CENELEC, Stassart 35, B 1050 Brussels.