

PV cell modeling의 수학적 고찰

박현아¹, 김효성[†]

Mathematical Consideration on PV Cell Modeling

Hyeonah Park¹ and Hyosung Kim[†]

Abstract - PV cell modeling is necessary both for software and hardware simulators in analyzing and testing the performance of PV generation systems. Unique I-V curve of a PV cell identifies its own characteristics by electrical equivalent model that is composed of diode constants (I_0 , v_t), photo-generated current (I_{ph}), series resistance (R_s), and shunt resistance (R_{sh}). Photo-generated current can be easily estimated since it is proportional to irradiation level. However, other electrical parameters should be solved from the manufacturer's data sheet that is consisted with three remarkable operating points such as open circuit voltage (V_{oc}), short circuit current (I_{sc}), and maximum power voltage/current (V_{MPP}/I_{MPP}). This paper explains and analyzes mathematical process of a novel PV cell modeling algorithm that was proposed by the authors with the name of "K-algorithm".

Keywords: PV generation system, EN50530, PV simulator, Cr-Si type, thin-film type, PV cell modeling.

1. 서 론

반도체를 사용한 PV cell에는 결정형, 박막형 및 두 종류를 조합한 탠덤형 등 다양한 종류가 있으며 각 종류의 PV cell은 고유한 I-V 특성을 갖는다^[1].

IEC의 태양광 효율기준규정 EN50530에는 태양광발전용 전력변환기(Power Conditioning System; PCS)에 대한 전반적인 효율 평가시험을 수행하기 위하여 PV simulator를 사용하도록 명시되어있다^[2]. 이 규정에 따르면 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 시험을 위하여 PV simulator는 결정형과 박막형 PV cell의 I-V 특성을 모두 모사할 수 있어야 한다. 이와 같이 PV simulator를 제작하기 위해서는 다양한 종류의 PV cell에 대한 전기적 등가회로의 모델링이 필수적이다^[3].

PV cell model의 전기적 등가회로를 찾기 위한 연구 중 Villalva 알고리즘의 경우 선정된 후보 R_s - R_{sh} 쪽에서

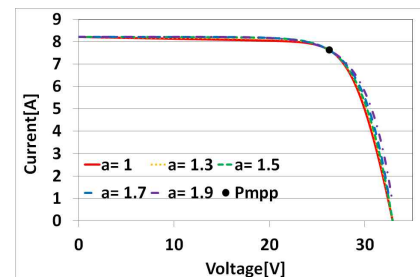


Fig. 1 Comparison on I-V curves according to diode ideality factor 'a'

P_{MAX} 를 찾는다^[4]. 구해진 P_{MAX} 와 제조사 데이터시트의 P_{MPP} 가 일치하지 않으면 다음 단계의 후보 R_s - R_{sh} 쪽에 대하여 위의 과정을 다시 시도하고 일치하면 알고리즘이 종료하게 된다. Villalva 알고리즘은 다이오드 정수 ($a=v_t/q/kT$) 값을 사용자가 외부에서 조정하여, 제조사 데이터시트에서 제공하는 I-V 특성곡선에 맞추어 시행착오적으로 찾아야 하는 단점이 있다.

Pedro 알고리즘은 수식의 전개상 다이오드 정수를 외부에서 지정하지 않고도 회로 파라미터를 구할 수 있다는 장점이 있지만, R_s 및 R_{sh} 를 동시에 독립적으로 바꾸어 가면서, 시행착오적인 반복방법에 의하여 전체 방정식을 만족하는 값을 결정하여야 하며 초기 값을 아주 적절히 설정하지 않으면 해의 수렴이 되지 않는다는 단점이 있다^[5].

Paper number: TKPE-2014-19-1-7

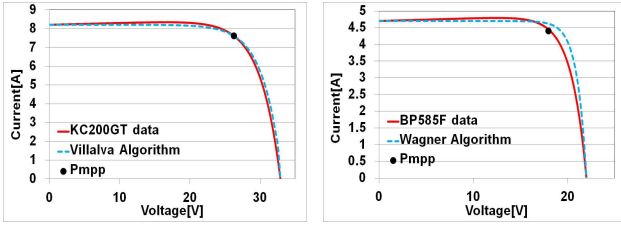
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Aug. 22, 2013; accepted Dec. 8, 2013

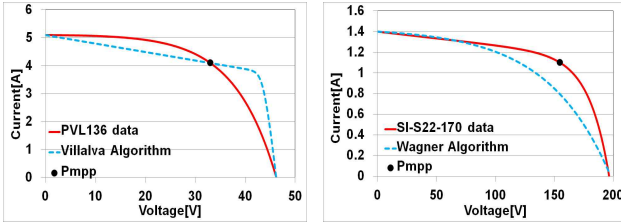
— 본 논문은 2013년 전력전자학회대회 외부장학금 수혜논문임



a) The application of Villalva algorithm

b) The application of Wanger algorithm

Fig. 2 Comparison of I-V curve for a Cr-Si type PV cell by each modeling algorithm



a) The application of Villalva algorithm

b) The application of Wanger algorithm

Fig. 3 Comparison of I-V curve for a Thin-film type PV cell by each modeling algorithm

따라서 실제적으로 사용하는데 어려움이 있으므로 본 논문에서는 비교 대상 알고리즘에서 제외한다.

Wagner 알고리즘의 경우 파라미터 추출계산을 한 번에 끝낸다는 장점이 있지만, 결정형에 대하여 수치해석적 방법으로 계산하기 때문에, 박막형과 같이 PV cell의 재료성분이 달라지면 추출된 특성곡선의 결과에 큰 오차가 발생한다^[6].

본 논문은 임의의 재질에 의한 PV cell에 대하여 오차와 컴퓨팅시간이 적은 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 I-V 특성곡선과 제안된 모델링 알고리즘 및 기존의 모델링 알고리즘에 따른 I-V 특성곡선 결과를 비교하여 제안된 알고리즘의 우수성을 증명한다.

2. PV cell modeling

2.1 접선의 기울기

PV cell 등가회로의 출력단자전류를 $i=f(i, v)$ 의 함수라고 할 때, PV cell의 세 가지 주요 운전점(I_{sc} , V_{oc} , P_{MPP})에서의 I-V 특성곡선의 접선기울기를 토대로 전기적 등가회로의 파라미터에 관하여 다음과 같이 방정식을 구할 수 있다.

$$di = di \frac{\partial f(i, v)}{\partial i} + dv \frac{\partial f(i, v)}{\partial v} \quad (1)$$

Table 1 Example of manufacturer's datasheet of PV panel

NA-F128GK Electrical data		
Description	Parameter	Initial Values
Maximum Power	P_{MPP}	150.6 [W _P]
Open Circuit Voltage	V_{OC}	60.8 [V]
Short Circuit Current	I_{SC}	3.54 [A]
Voltage at point of maximum power	V_{MPP}	48.6 [V]
Current at point of maximum power	I_{MPP}	3.10 [A]
Temperature coefficient of open circuit voltage	αV_{OC}	-0.30 [% / °C]
Temperature coefficient of short circuit current	αI_{SC}	+0.07 [% / °C]
Temperature coefficient of maximum power	αP_{MPP}	-0.24 [% / °C]

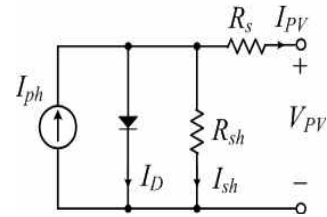


Fig. 4 Single-diode equivalent model of PV cell

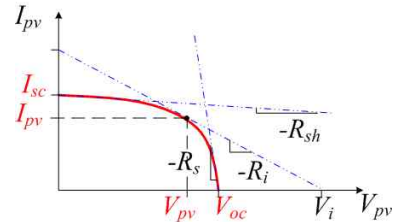


Fig. 5 Typical I-V curve of PV cell

$$\therefore \frac{di}{dv} = \frac{\frac{\partial f(i, v)}{\partial v}}{1 - \frac{\partial f(i, v)}{\partial i}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial f(i, v)}{\partial v} = -\frac{1}{R_{sh}} + \left(\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \left(\frac{1}{n_s v_t} \right) e^{\frac{v + iR_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f(i, v)}{\partial i} = -\frac{R_s}{R_{sh}} + \left(\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{R_{sh}} \right) \left(\frac{R_s}{n_s v_t} \right) e^{\frac{v + iR_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \quad (4)$$

단락회로 운전점 및 최대전력 운전점에서 I-V 특성곡선의 접선 기울기를 나타내면 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{di}{dv} \right|_{v=0, i=I_{sc}} &= \frac{-\left[\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]}{1 + R_s \left[\frac{I_{sc}R_s + I_{sc}R_{sh} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right]} \\ &= -\frac{1}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (5)$$

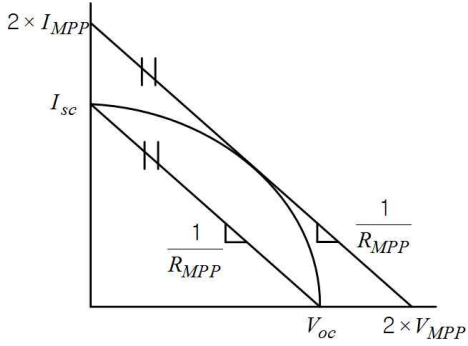


Fig. 6 Physical concept of equation (9)

$$\frac{di}{dv} \Big|_{v=v_{MPP}, i=i_{MPP}} = \frac{- \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]}{1 + R_s \left[\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{sc}R_s + R_{sh}I_{sc} - V_{oc}}{n_s v_t R_{sh}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s - V_{oc}}{n_s v_t}} \right]} = - \frac{1}{R_{MPP}} \quad (6)$$

식 (5)에 의해 v_t 를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$v_t = \frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s \ln \left[\frac{n_s v_t R_s}{(I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc})(R_{sh} - R_s)} \right]} + R_s \times K_s \quad (8)$$

(단, K_s 는 0.5일 때 최적)

식 (6)에 의해 v_t , R_{sh} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

$$R_{sh} = \frac{(I_{sc} - I_{MPP})R_s^2 + (n_s v_t - I_{sc}I_{MPP})R_s + R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t)}{(I_{MPP} - I_{sc})R_s + I_{sc}R_{MPP} - V_{MPP} - n_s v_t} \quad (11)$$

$$R_s = \frac{A(R_{MPP}(V_{MPP} - n_s v_t) - BD)}{CD + B(I_{MPP} - I_{sc}) - A(n_s v_t - I_{sc}R_{MPP})} \quad (12)$$

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

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

3. 제안된 PV cell modeling

3.1 제안된 PV cell modeling

앞 절에서 서술된 식을 기본으로 다양한 재질의 PV cell에 적용 가능하며, 외부에서 임의로 값을 지정하지 않고 적은 반복계산으로도 데이터시트의 특성곡선과 가장 유사한 결과를 도출할 수 있는 K-알고리즘을 제안한다.

$$R_{s_step} = \frac{V_{oc} - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (13)$$

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

식 (13), (14)를 이용하여 R_{s_try} 와 v_t 의 초기값을 설정하고, 식 (11)에 대입하여 R_{sh} 를 계산한다. 제안된 K-알고리즘의 반복루틴에서 R_{s_try} 는 R_{s_step} 만큼씩 증가 하며 그에 따라 R_{sh} , v_t 의 값이 중속적으로 계산된다. R_{s_try} 와 R_s 차이의 크기가 0.0001 이하인 경우 R_s 의 값을 찾은 것으로 간주하여 반복루틴을 종료한다. v_t 의 수식정의에 따라 식 (7)을 K1-알고리즘, 식 (8)을 K2-알고리즘, 식 (10)을 K3-알고리즘이라고 명명한다.

3.2 제안된 알고리즘의 타당성 검토

제안된 K-알고리즘을 결정형 및 박막형 두 가지의 다른 재료의 PV cell에 적용하여 파라미터의 수치해석 결과를 도시하면 그림 8 및 그림 9와 같다.

그림 8 및 그림 9는 결정형, 박막형의 두 가지 다른 종류의 PV cell에 대하여 제안된 K-알고리즘을 사용한 등가회로 모델의 수치해석적 수렴과정을 보인다.

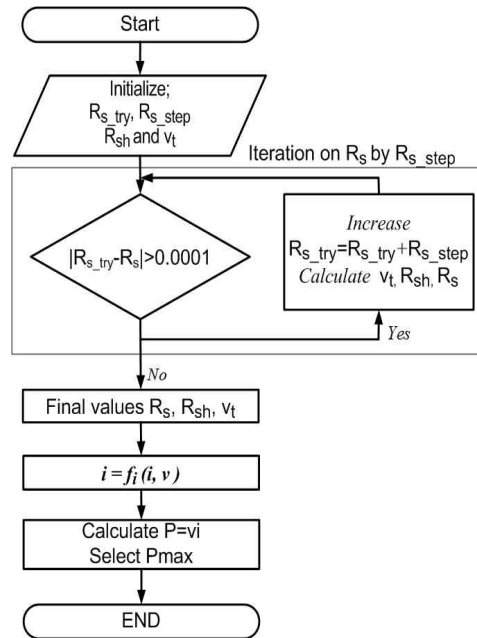


Fig. 7 Flow chart of Proposed K-algorithm

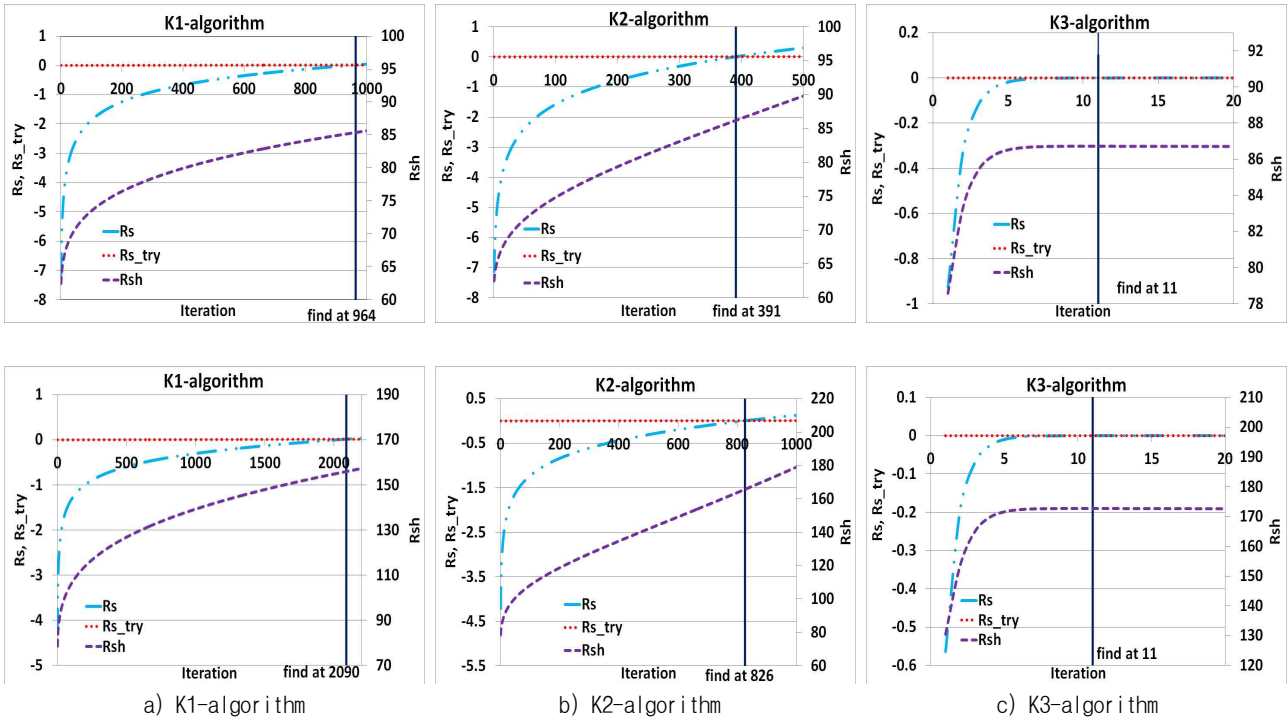


Fig. 8 Numeric analytical characteristics for the parameters of Cr-Si type PV cells AT50(upper) and S13(lower)

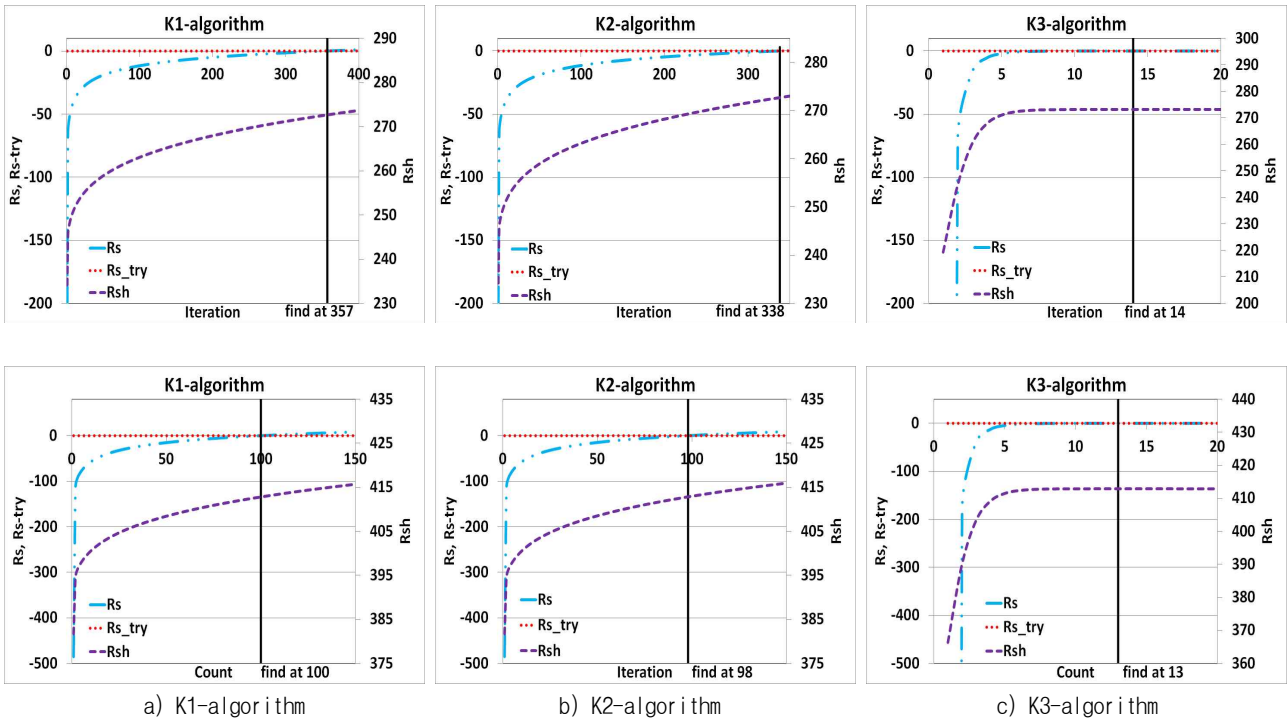


Fig. 9 Numeric analytical characteristics for the parameters of thin-film type PV cells QS55DDF(upper) and X73-A(lower)

제안하는 K-알고리즘에서 R_{s_try} 의 값이 R_s 보다 항상 크며, 반복루틴의 초기에는 R_s 의 값은 음수이지만 반복회수가 증가함에 따라 R_s 와 R_{s_try} 의 값이 동일하게 수렴한다. 이때 R_{sh} 등 다른 모든 파라미터의 값이 종속적으로 계산되고 해를 갖게 되며, K3-알고리즘의 경우 결정형과 박막형 모두에서 해의 수렴과정이 가장 빠른 것을 볼 수 있다.

EN50530규정에서는 PV simulator의 오차를 평가하기 위하여 MPPT의 동작 범위인 $V_{MPP} \pm 10\%$ 에서 오차를 적분하도록 규정하고 있다. 기존의 알고리즘과 제안하는 K-알고리즘에 따른 I-V 특성곡선과 오차를 그래프로 나타내면 그림 10에서 그림 13까지와 같으며 오차를 적분하면 표 3과 같다.

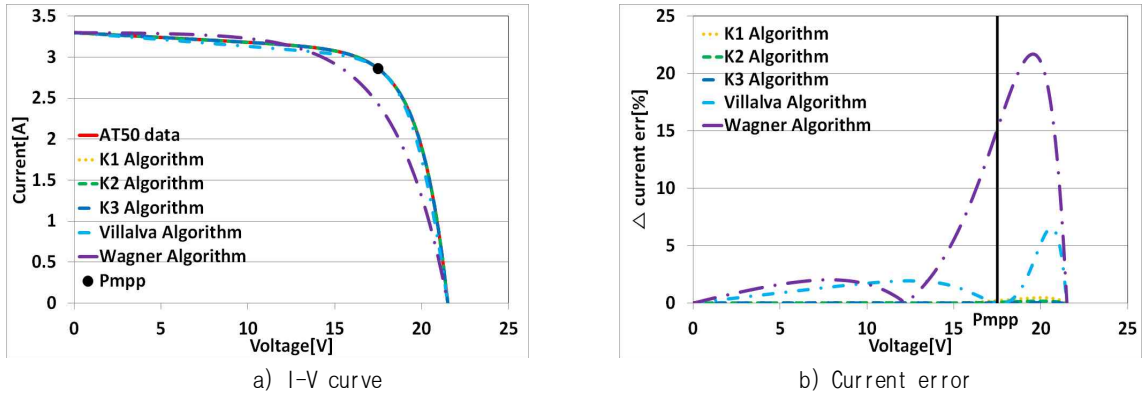


Fig. 10 Comparison of I-V curve for AT50(Cr-Si type)

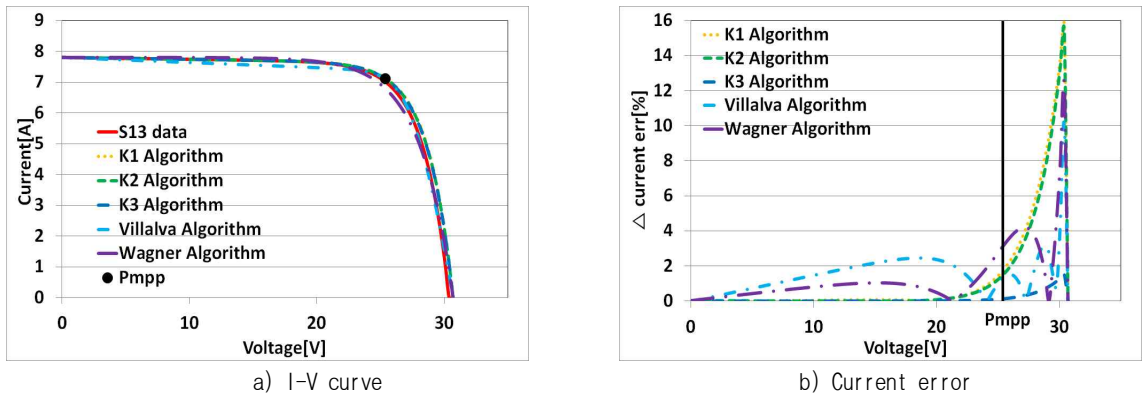


Fig. 11 Comparison of I-V curve for S13(Cr-Si type)

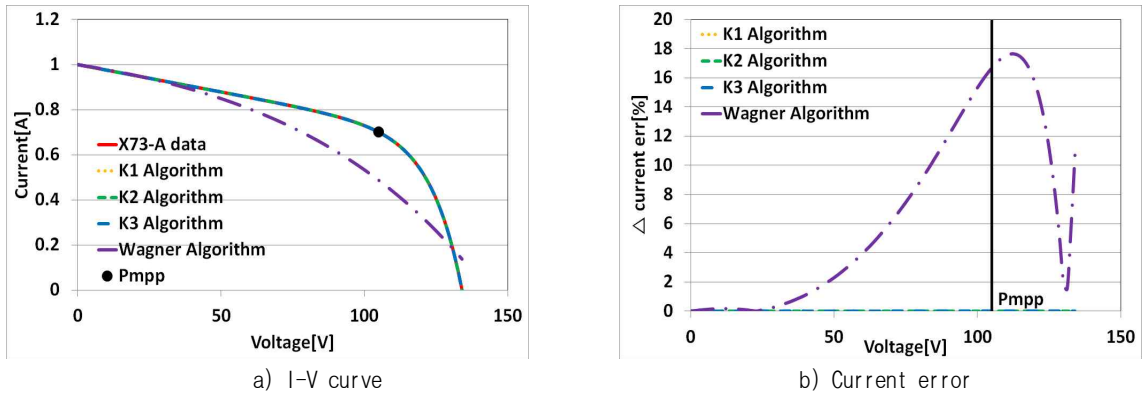


Fig. 12 Comparison of I-V curve for X73-A(Thin-film type)

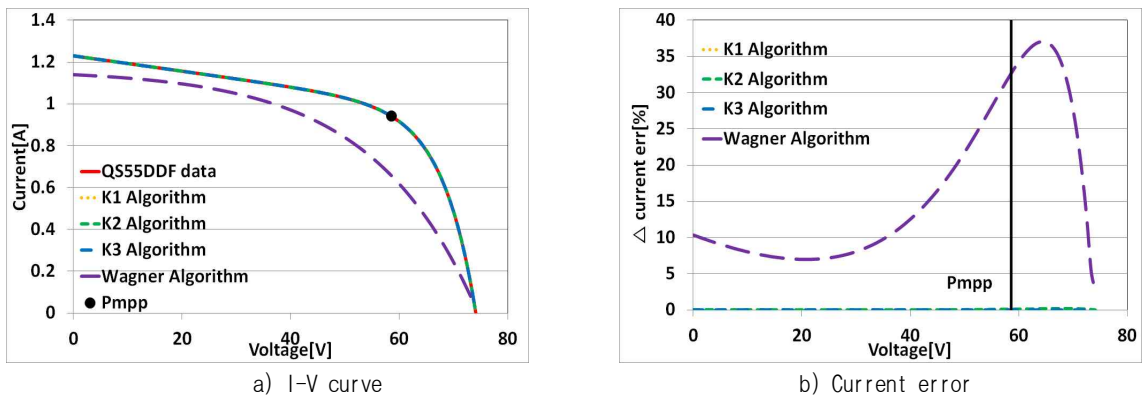


Fig. 13 Comparison of I-V curve for QS55DDF(Thin-film type)

Table 2 Manufacturer's datasheet of each PV panel specimen

PV panel Parameter	AT50	S13	X73-A	QS55DDF
Manufacturer	Air Therm Solartech nik	Aleo Solar AG	Inventux Technologies AG	QS Solar
$I_{sc}[A]$	3.3	7.8	1	1.23
$V_{oc}[V]$	21.5	30.7	134	74.1
$I_{MPP}[A]$	2.86	7.1	0.7	0.94
$V_{MPP}[V]$	17.5	25.4	105	58.6
$P_{MPP}[W]$	50	180	73	55

Table 3 Comparison result of each modeling algorithm for several PV panels (iteration number and current-error integration)

PV panel Algorithm	AT50		S13		X73-A		QS55DDF	
	N_{iter}	I_{err}	N_{iter}	I_{err}	N_{iter}	I_{err}	N_{iter}	I_{err}
K1	964	0.52	2090	2.14	100	0.004	357	0.09
K2	391	0.2	826	1.86	98	0	338	0.08
K3	11	0.07	11	0.17	13	0.015	14	0.002
Villalva	3524	0.01	2876	0.91	Fail*		Fail*	
Wagner	1	14.43	1	2.93	1	30.4	1	30.2

N_{iter} : Iteration number of each modeling algorithm

I_{err} : Integral error in the voltage range of $V=V_{MPP}\pm 10\%$

*: R_{sh} becomes infinite in one iteration loop

Villalva 알고리즘의 경우 Wagner 알고리즘에 비해 오차가 많이 발생하지 않고 결정형에서 데이터시트의 특성 곡선을 근사하게 구현 하였지만, 박막형의 경우 알고리즘이 수렴하지 않고, 실행이 불가능 한 경우가 존재하였다.

Wagner 알고리즘의 경우 한 번의 계산으로 I-V 특성 곡선을 구현할 수 있지만, 오차가 심하게 발생하였다.

제안하는 K-알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 전기적 등가회로의 파라미터를 구하기 위한 반복 횟수와 오차가 적게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 그 중에서 K3-알고리즘이 반복회수와 오차적분의 측면에서 종합적으로 가장 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 PV cell의 등가모델을 구하기 위한 방정식을 수립하였으며 반복계산에 의하여 파라미터를 구하는 K-알고리즘을 제시하고 수치해석적 특징을 분석하였다.

기존의 알고리즘은 다이오드 정수의 값을 외부에서 임의로 조정하여 시행착오적으로 구하거나, PV cell의 재질이 다른 경우에는 적용이 되지 않는다는 단점이 있었다. 또한 여러 번 반복 계산하여야 I-V 특성곡선을 구현할 수 있었다.

제안된 K-알고리즘은 기존의 알고리즘과 달리 외부에서 다이오드 정수를 조작하여 줄 필요가 없이 다양한 종류의 PV cell에 대하여 자동적으로 파라미터를 찾으

며, 적은 반복횟수로도 가장 적은 오차가 발생하였고 EN50530에 규정되어있는 MPPT 운전범위에서도 오차가 가장 적게 나타남을 확인할 수 있었다. 오차목표를 낮추면 더욱 정밀한 모델링도 가능하다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A2039747). 이 논문은 카코뉴에너지의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [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.
- [3] S.Gonzalez, S.Kuzmaul, D.Deuel, R.Lucca, "PV array simulator development and validation," *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 2849-2852, 2010.
- [4] M.G.Villalva, J.R.Gazoli, E.R.Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of Photovoltaic arrays," *IEEE Trans. on PE*, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [5] D.Sera, R.Teodorescu and P.Rodriguez, "PV Panel model based on datasheet values," in *Proc. on ISIE07*, pp. 2392-2396, 2007.
- [6] C.Bendel and A.Wagner, "Photovoltaic measurement relevant to the energy yield," in *Proc. WCPEC-3 World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, pp. 1-4, May 2003.



박현아(朴炫娥)

1990년 11월 6일생. 2013년 공주대 전기전자 제어공학부 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.