

새로운 태양전지 모델의 파라미터 추출법

金旭*, 金尙鉉*, 李鐘鶴*, 崔宇鎭†

A Novel Parameter Extraction Method for the Solar Cell Model

Wook Kim, Sang-Hyun Kim, Jong-Hak Lee, and Woojin Choi

요 약

태양광 발전시스템의 설치 용량이 증가함에 따라 시스템 효율을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고성능 시스템의 설계 및 시험을 위해서는 태양전지의 모델링을 바탕으로 태양전지의 물리적 특성에 관해 정확히 이해하는 것이 중요하다. 그러나 태양전지의 모델은 다수의 파라미터가 얽힌 비선형 형태이며, 모델식의 파라미터 값을 얻기 위한 기존의 방식에서는 오차를 동반하는 실제와 다른 가정을 전제로 하므로 결과적으로 추출된 파라미터의 정확도가 저하되게 되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 제조사가 표준상태에서 측정하여 공개하는 태양전지의 I-V 커브로부터 다이오드의 이상계수와 역포화 전류를 구하고 이로부터 저항 성분이 없는 이상적인 태양전지의 I-V 커브를 도출한 뒤, 실측된 I-V 커브와 차이를 최소화하는 직·병렬 저항값을 추출하는 새로운 방식을 제안한다. 기존의 방식과 제안된 방식의 모델링을 통하여 얻은 파라미터를 이용해 구현한 I-V 커브와 실측 I-V 커브와의 상관관계를 최소자승법을 통해 계산함으로써 제안된 방법의 유용함을 증명하였다.

ABSTRACT

With the increase in capacity of photovoltaic generation systems, studies are being actively conducted to improve system efficiency. In order to develop the high performance photovoltaic power system it is required to understand the physical characteristics of the solar cell. However, solar cell models have a non-linear form with many parameters entangled and conventional methods suggested to extract the parameters of the solar cell model require some kind of assumptions, which accompanies the calculation errors, thereby lowering the accuracy of the model. Therefore, in this paper a novel method is proposed to calculate the ideality factor and reverse saturation current of the solar cell from the I-V curve measured and announced by solar cell manufacturers, derive the ideal I-V curve, and then extract the series and shunt resistances value from the difference between the ideal and measured I-V curve. Also, validity of the proposed method is demonstrated by calculating the correlation between I-V curve based on modeling parameters and I-V curve actually measured through least squares method.

Key Words : Solar Cell Model, Parameter Extraction, Reverse Saturation Current, Ideality Factor, I-V Curve

1. 서 론

태양광 발전시스템이 주요한 신재생에너지원으로 인식되기 시작하면서 관련 분야에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 다른 신재생에너지원에 비하여 상대적으로 낮은 효율과 높은 발전단가, 넓은 설치 면적이 요구되는 단점을 극복하기 위해서는 웨이퍼나 셀 등 재료적인 측면에서의 효율 개선 노력과 전력변환 과정에

†교신저자 : 정회원, 송실대 전기공학부 조교수

E-mail : cwj777@ssu.ac.kr

*학생회원, 송실대 전기공학부 석사과정

접수일자 : 2009. 8. 18 1차 심사 : 2009. 9. 3

심사완료 : 2009. 9. 10

서 발생하는 손실 저감, 최대전력 추종제어에 대한 연구가 필수적이다. 특히 고성능 시스템의 설계 및 시험을 위해서는 태양전지의 모델링을 바탕으로 태양전지의 물리적 특성에 관해 정확히 이해하는 것이 요구되며, 이를 반영한 모사장치의 제작은 매우 중요하다. 특히 대용량 전력변환기의 개발단계에서 모듈과 실제 연결하여 전력변환기를 시험하는 것은 적절치 않으므로 실제 태양전지의 출력특성을 정확히 모사할 수 있는 가상구현 시스템이 반드시 요구된다. 그러나 태양전지의 모델은 다수의 파라미터가 얽힌 비선형 형태이며, 모델식의 파라미터 값을 얻기 위한 기존의 방식에서는 오차를 동반하는 실제와 다른 가정을 전제로 하므로 결과적으로 추출된 파라미터의 정확도가 저하되게 되는 단점이 있다.

기존의 태양전지 파라미터 추출법 중 비교적 간단한 방법으로는 I-V 커브의 단락전류와 개방전압이 나타나는 지점에서의 순간 기울기로 태양전지의 직·병렬 저항을 추정하는 방법이 있고, 서로 다른 두 가지의 일사 조건에서 측정된 I-V 커브를 이용하여 전압 및 전류의 변화량 비로 직렬저항을 추정하는 방법이 있다^[1]. 또한 Lambert의 W함수를 이용한 복잡한 수치해석을 통해 파라미터를 구하는 방법, 암(暗)상태에서 태양전지에 전압을 인가하여 다이오드 특성 커브를 얻고 광(光)조사 상태 특성 커브와의 차이를 수식으로 표현하여 저항값을 계산하는 방법, I-V 커브의 컨덕턴스를 이용하여 태양전지 방정식을 컨덕턴스가 포함된 제안하는 형태의 방정식으로 변형하고 그 식이 나타내는 커브의 기울기와 절편의 관계로부터 파라미터들을 추정하는 방법 등이 있다^[2-6]. 그러나 이러한 방법들은 비선형적으로 얽혀있는 태양전지 방정식의 다수의 파라미터를 모두 정확히 추출해 내기 위해 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 따라서 보통 이상계수를 1로 가정하거나 병렬저항을 무시한 경우가 많으며, 모든 파라미터를 완전하게 추출해내는 방법은 제시된 바가 없다. 또한 대부분의 연구에서 추출한 파라미터를 이용하여 그린 I-V 커브와 실측된 I-V 커브를 비교 검증하지 않아 그 정확성을 알기 어렵다.

본 논문에서는 태양전지 I-V 커브로부터 다이오드의 특성을 이용하여 이상계수를 구하고 저항성분이 배제된 태양전지 방정식으로부터 역포화 전류를 계산하였다. 이 값들을 태양전지 방정식에 대입하여 저항성분이 배제된 이상적인 태양전지의 I-V 커브 데이터를 만들고 실측 커브와의 차를 계산함으로써 직·병렬저항의 값을 결정하였다. 최종적으로 결정된 파라미터 값

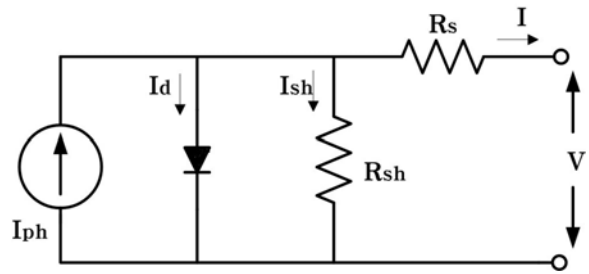


그림 1 태양전지의 등가 회로 모델
Fig. 1 Equivalent circuit model of the solar cell

을 이용하여 그려진 I-V 커브와 실측 I-V 커브와의 상관관계를 최소자승법을 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 태양전지 모델

태양전지 모델은 그림 1의 등가회로와 같고 식 (1)의 다이오드 방정식에 광생성 전류원(I_{ph})과 다이오드의 직렬저항(R_s), 병렬저항(R_{sh})이 포함된 식 (2)와 같이 표현된다.

$$I_D = I_{sat} \left(\exp \frac{qV_D}{nkT} - 1 \right) \tag{1}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{N_s nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{2}$$

I_{sat} : Reverse Saturation Current, n : Ideality Factor, k : Boltzman's Constant, T : Absolute Temperature q : Electron Charge, N_s : Number of Series Cells

제조사에서 제공하는 측정 자료는 25°C 온도에서 표준 AM 1.5 및 100[mW/cm²] 일사조건에서 측정된 I-V 커브와 개방전압(V_{oc}), 단락전류(I_{sc}), 최대전력점(MPP)의 전압(V_{mpp}), 전류(I_{mpp}), 전력값(P_{max}) 등이다. 식 (2)와 같은 단일 다이오드 태양전지 모델의 확립을 위해서는 이 값들을 이용하여 태양전지 방정식의 4가지 파라미터 R_s , R_{sh} , n , I_{sat} 값을 추출해내야 한다.

2.2 I-V 커브 형태에 대한 파라미터의 영향

그림 2에서 4는 태양전지의 4가지 파라미터들이 태양전지 출력에 어떠한 영향을 미치는지를 나타낸 그림이다. 태양전지 방정식에 파라미터를 대입하여 I-V 커

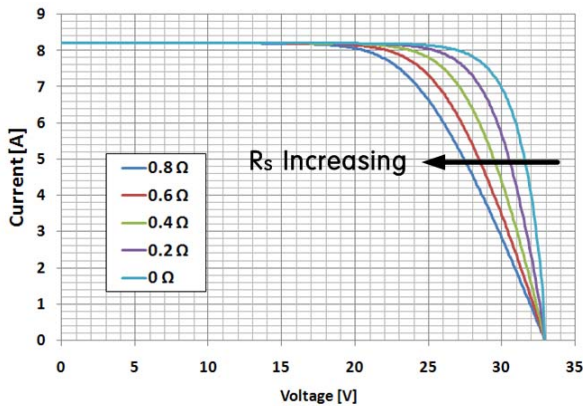


그림 2 Rs의 변화가 I-V 커브에 미치는 영향
Fig. 2 Effect of Rs variation on the I-V curve

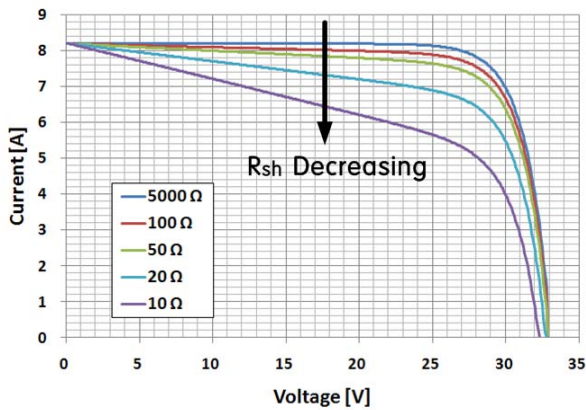


그림 3 Rsh의 변화가 I-V 커브에 미치는 영향
Fig. 3 Effect of Rsh variation on the I-V curve

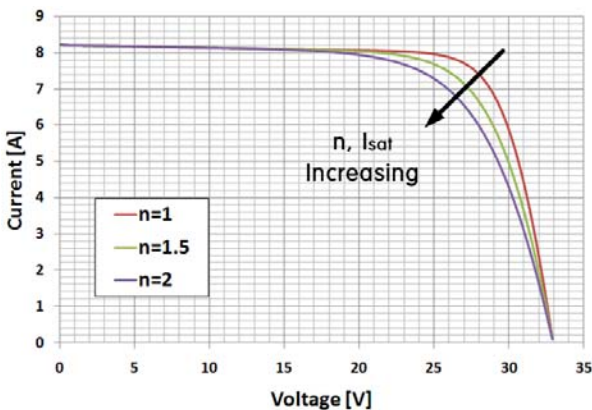


그림 4 n과 Isat의 변화가 I-V 커브에 미치는 영향
Fig. 4 Effect of n & Isat variation on the I-V curve

브를 그리고, 다른 파라미터는 고정한 후 하나의 파라미터의 값을 증가 또는 감소시키면서 I-V 커브의

형태에 나타나는 변화를 관찰하였다. 프로그램은 LabVIEW로 작성되었고 LabVIEW의 연속실행 기능을 이용하여 슬라이드 바에 의해 변화된 파라미터 값에 의한 I-V 커브 형태의 변화가 실시간으로 표현되어 특정 파라미터의 변화가 I-V 커브의 형태에 어떠한 영향을 미치는지를 시각적으로 쉽게 확인할 수 있다. 먼저, Rs의 값을 0에서 부터 점점 증가시키도록 그림 2와 같이 전압원 영역의 출력이 감소함을 알 수 있고, Rsh의 값을 무한대로부터 점점 감소시키면 그림 3과 같이 전류원 영역의 출력이 감소함을 알 수 있다. 이상계수 n의 변동은 식 (1)에서 보듯이 역포화 전류의 변동을 동시에 초래하며 그림 4와 같이 주로 MPP 부근에서의 I-V 커브 형태를 변화시킴을 알 수 있다. 따라서, 이상계수를 1로 가정하여 파라미터를 추출할 경우 이를 이용하여 그려진 I-V 커브에서는 상당한 오차를 피하기 어려움을 알 수 있다.

2.3 제안된 파라미터 추출법

본 논문에서 제안하는 태양전지 모델의 파라미터 추출법에서는 먼저 다이오드 I-V 커브의 특성을 이용하여 실측된 태양전지 I-V 커브로부터 이상계수를 추출한다. 추출된 이상계수의 값과 태양전지의 개방회로 조건을 이용하면 역포화 전류의 값을 구할 수 있다. 다음으로 이상계수와 역포화 전류의 값을 태양전지 방정식에 대입하고 직·병렬저항성분은 배제한 이상적인 I-V 커브의 데이터를 얻는다. 2.2절에서 살펴본 바와 같이 저항성분에 의한 출력 감소 때문에 실측된 I-V 커브는 이상적인 I-V 커브보다 Fill Factor가 작다. 따라서 이상적인 I-V 커브와 실측 I-V 커브와의 차이를 계산함으로써 Rs, Rsh값을 구할 수 있음을 알 수 있다. 추출된 파라미터 값의 정확도는, 다양한 태양전지 모듈의 실측된 I-V 커브와 추출된 파라미터 값들을 태양전지 모델에 대입하여 그린 I-V 커브와의 상관관계를 최소자승법을 통해 검증하였다.

2.3.1 이상계수 결정

이상계수 n은 다이오드의 물질, 온도에 따른 변수로 이상적 다이오드 특성으로부터의 이탈정도를 나타내는 계수이다. 일반적으로 1에서 2사이의 값을 가지며 가장 이상적일 경우 1이 된다. 다이오드의 이상계수는 다이오드 I-V 커브의 전류에 대한 자연로그를 취하여 그린 곡선의 기울기로부터 추정해 낼 수 있는데, 곡선의 기울기만이 고려 대상이므로 계산을 용이하게 하기 위해 지수부분의 -1은 무시하였다⁷⁾. 따라서 식 (3)으

로 간략화 하여, 양변에 자연로그를 취하고 정리하면 식 (4)가 된다. 따라서 식 (4) 커브의 기울기와 이상계수가 서로 반비례 관계인 것을 이용하면 식 (5)와 같이 이상계수의 값을 구할 수 있다. 일반적인 다이오드의 I-V 특성 커브를 식 (4)와 같은 커브로 변환하여 그리면 그림 5와 같이 S자 모양의 곡선이 되고, 다이오드가 이상적이라고 가정하면 식 (5)의 n 값은 1이 되며, 그림 5의 영역 2에 그려진 접선의 기울기가 된다^[7-9].

$$I_D = I_{sat} \left(\exp \frac{qV_D}{nkT} \right) \tag{3}$$

$$\ln(I_D) = \left(\frac{q}{nkT} \right) V_D + \ln(I_{sat}) \tag{4}$$

$$n = \frac{q}{\frac{\Delta \ln(I_D)}{\Delta(V_D)} \cdot kT} \tag{5}$$

실제 반도체에서는 영역 1과 3에서 n값이 2보다 커지고, 영역 2에서는 1과 2사이의 값을 갖게 되는데 영역 2에서 접선의 기울기가 가장 클 때의 값을 이상계수로 사용한다. 다이오드가 이상적인 경우 영역 2 직선의 기울기에 비해 영역 1에서 곡선의 기울기가 작은 원인은 순방향 바이어스 전압이 낮아 분리되었던 전자와 정공이 재결합하였기 때문이며, 영역 3에서 기울기가 다시 작아지는 원인은 PN 접합 내부의 기생저항에

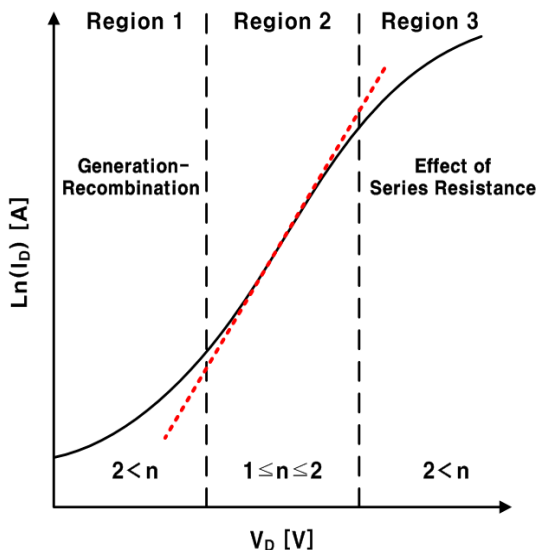


그림 5 다이오드의 $\ln(I_D)$ - V_D 커브
 Fig. 5 $\ln(I_D)$ - V_D curve of the diode

의한 손실 때문이다^[9,10]. 위와 같은 다이오드의 특성을 태양전지에 적용하면 이상계수를 추출할 수 있다. 측정된 태양전지의 I-V 커브 데이터를 다이오드 특성 곡선으로 변환하고 이것으로부터 식 (4)의 커브를 그리고 영역 2에서 곡선의 기울기가 가장 클 때의 값을 식 (5)에 대입하여 이상계수를 결정한다.

2.3.2 역포화 전류의 결정

역포화 전류는 다이오드에 역방향 바이어스를 걸었을 때, P-N 접합에서 양 영역의 소수 캐리어의 농도가 증가하게 되면서 공핍층을 지나 상대 영역으로 들어가는 미세한 전류를 의미한다. 이것은 다이오드 제조조건에 의해 결정되는 고유한 값으로 역바이어스 전압에 영향을 받지 않고, 온도가 10°C 상승할 때 마다 약 2배 증가하는 특성이 있다^[11].

태양전지 방정식을 식 (6)과 같이 정리하고 앞 절에서 추출된 이상계수와 개방전압 조건에서의 이상적인 저항 값 및 측정된 I-V 데이터를 대입하면 역포화 전류의 값을 구할 수 있다. 따라서 역포화 전류 값은 I-V 커브의 측정 데이터에 따라 값이 달라지게 된다. I-V 커브상의 데이터 중 개방전압은 다이오드 전류가 가장 큰 영역이므로 역포화 전류의 영향이 가장 크기 때문에 이 지점에서 계산한 역포화 전류의 정확도가 가장 높다^[12]. 또한 개방전압 조건에서는 출력 전류가 0이고 직렬저항에 의한 전압강하가 없기 때문에, 앞 절에서 계산된 이상계수 값과 개방전압, 그리고 단락 전류의 값을 식 (6)에 대입하면 역포화 전류를 구하기 위한 미지수는 Rsh만 남게 된다. 그런데 식 (6)의 분자식에서 Rsh를 분모로 하는 항은 상대적으로 극히 작은 값이 되어 역포화 전류값을 구하는데 거의 영향을 미치지 못하므로 Rsh의 값을 무한대로 가정해도 무방하다.

$$I_{sat} = \frac{I_{ph} - I - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right)}{\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s nkT} \right) - 1} \tag{6}$$

2.3.3 직 · 병렬 저항의 결정

앞서 구한 이상계수와 역포화 전류의 값을 이용하면 태양전지 방정식에서 Rs 및 Rsh를 이상적으로 가정하여 I-V 커브의 데이터를 얻을 수 있다. 그림 2에서 보듯이 직렬저항 Rs는 태양전지 I-V 커브의 전압원 영역에서의 출력을 감소시키는데 이상적인 I-V 커브의 전압 값(V_{ideal})과 실측된 I-V 커브 전압 값(V)의 차이

만큼 출력전압을 강하시키는 요인으로 작용하게 된다. 이를 식 (7) 및 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ideal} - V = R_s I \tag{7}$$

$$R_s = \frac{V_{ideal} - V}{I} \tag{8}$$

그림 3에서 보듯이 병렬저항 Rsh는 태양전지 I-V 커브의 전류원 영역에서 이상적인 I-V 커브의 전류 값 (I_{ideal})과 실측된 I-V 커브 전류 값(I)의 차이만큼 출력 전류를 강하시키는 요인으로 작용하게 된다. 이를 식 (9) 및 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ideal} - I = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{9}$$

$$R_{sh} = \frac{V + I \left(\frac{V_{ideal} - V}{I} \right)}{I_{ideal} - I} = \frac{V_{ideal}}{I_{ideal} - I} \tag{10}$$

3. 실험 및 고찰

실험에 사용한 데이터는 Kyocera사 200[W]급 모듈로 54개의 셀이 직렬로 연결되어 있으며 제조사가 표준온도(25°C)에서 일사량별로 측정된 I-V 커브를 소프트웨어를 이용하여 디지털 데이터로 변환한 후 그림 6에 나타내었다. 이 중 표준 일사량의 I-V 커브를 대상으로 전술한 방법에 따라 파라미터들을 추출하였다. 가장 먼저 이상계수를 추출하기 위하여 I-V 커브를 식 (4)의 커브로 변환하여 그림 7에 나타내었다. 식

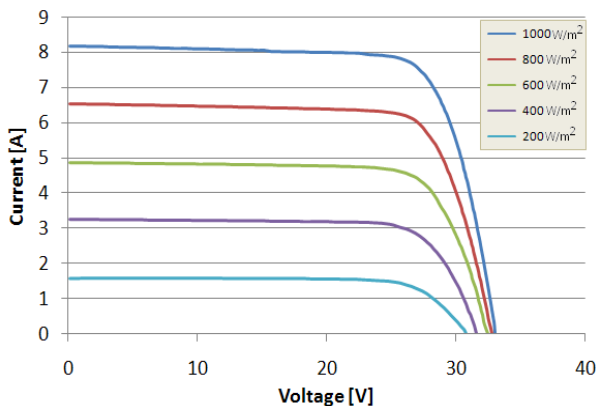


그림 6 제조사에서 제공된 일사량별 I-V 커브
Fig. 6 I-V curves at various irradiance levels

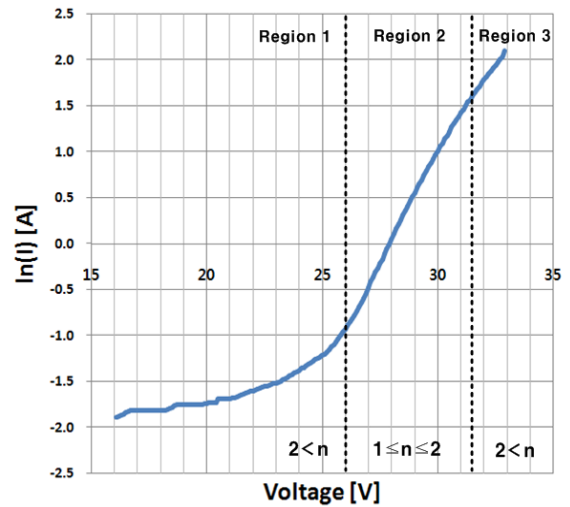


그림 7 교세라 200[W]모듈의 $\ln(I_0)-V_0$ 곡선
Fig. 7 $\ln(I_0)-V_0$ curve of the Kyocera 200[W] module

(5)로부터 영역 2에서 이상계수 n은 1.1780으로 계산되었고 n값을 식 (6)에 대입하여 $1.4665E-08[A]$ 의 역포화 전류값을 계산하였다. 다음으로 추출된 이상계수와 역포화 전류 값을 태양전지 방정식에 대입하고 Rs와 Rsh성분은 배제하여 다시 그린 I-V 커브와 태양전지 모듈의 실측 I-V 커브를 그림 8에 나타내었다. 앞서 설명된 바와 같이 이상적인 커브에 비해 실측 커브에서는 전압원 및 전류원 영역에서 각각 전압, 전류값이 조금씩 감소하는 모습을 볼 수 있으며, Rs와 Rsh의 영향임을 알 수 있다. Fill Factor는 이상적인 커브가 0.847, 실측된 커브는 0.758로 Rs와 Rsh의 영향에 의해 출력전력이 약 10% 감소함을 알 수 있다. I-V 커브의 각 지점에서의 데이터를 이용하여 I-V 커브와 식 (8) 및 식 (10)에 의해 계산된 Rs와 Rsh값을 개방전압

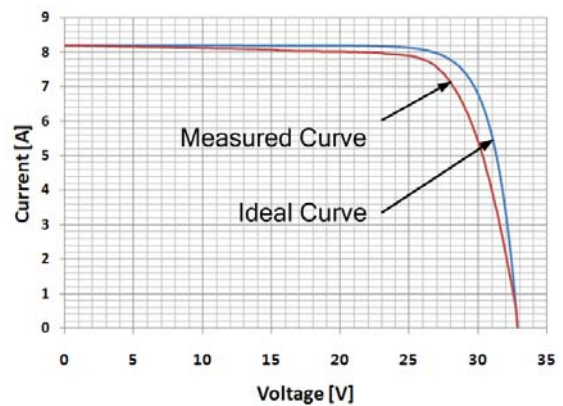


그림 8 이상적인 I-V 커브와 실측 I-V 커브
Fig. 8 Ideal I-V curve and measured I-V curve

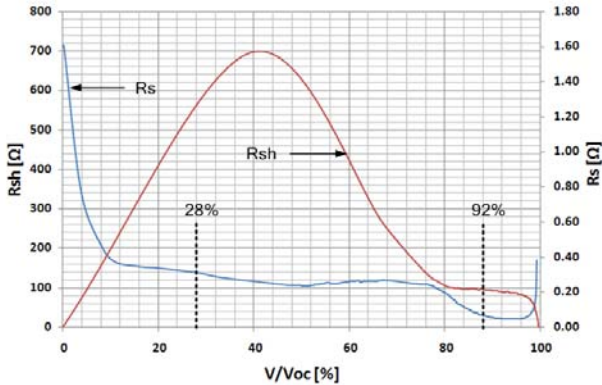


그림 9 계산된 Rs 및 Rsh의 곡선
Fig. 9 Calculated Rs and Rsh curve

대비 측정 전압을 기준으로 그림 9의 그래프에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Rs 및 Rsh값이 일정하지 않음을 알 수 있다. 따라서 어떤 지점에서 계산된 Rs와 Rsh의 값을 이용하여 그려진 태양전지의 I-V 커브가 실측커브에 가장 근사한 결과를 나타내는지 결정하여야 한다. 이를 위해 그림 10과 같이 I-V 커브 전영역에서 계산된 저항값을 태양전지 방정식에 차례로 대입하면서, 추출된 파라미터를 이용한 곡선과 데이터 쉬트상의 곡선간의 상관관계를 분석하였다. LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 최소자승법에 의해 두 곡선의 상관관계를 자동으로 계산해 주는 프로그램을 작성하고, 이를 이용하여 최적의 결과를 나타내는 직·병렬 저항값을 결정하였다. 결과적으로 그림 9에서 개방전압 대비 92%지점(30.27[V])에서 계산된 Rs의 값(0.2015 [Ω])과 개방전압대비 28%지점(9.12[V])에서 계산된 Rsh의 값(138.19[Ω])을 이용한 I-V 커브가 실측커브에 대해 가장 높은 상관관계(99.96%)를 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 방법의 일반화를 위해 국내·외에 시판되는 다양한 종류의 모듈(20[W], 40[W], 130[W], 170[W], 190[W], 210[W])과 2.2[W]급 단 셀의 측정된 I-V 커브를 입수하고, 제안된 방법을 이용하여 이상계수와 역포화 전류를 추출한 후 측정된 I-V 커브의 데이터를 이용하여 계산된 Rs 및 Rsh값들 중 측정된 I-V 커브와 가장 높은 상관관계를 나타내는 값들의 데이터를 표 1에 나타내었다. 개방전압 대비 92%지점의 데이터를 이용하여 계산된 Rs의 값과 28%지점에서의 데이터를 이용하여 계산된 Rsh의 값을 이용하여 그린 I-V 커브가 측정된 I-V 커브에 대해 99.7% 이상의 정확도로 일치함을 알 수 있었다. 따라서 이 두 지점에서 계산된 Rs 및 Rsh의 값이 제조사나 용량에 무관하게 가장 정확한 파라미터의 값이 됨을 확인하였다.

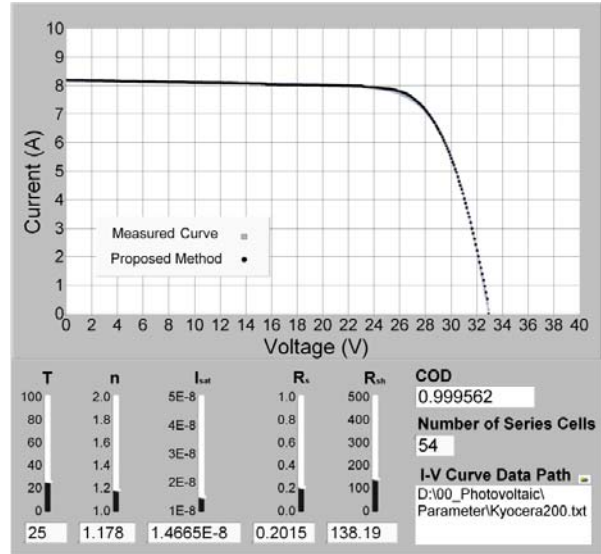


그림 10 LabVIEW에 의한 커브피팅 소프트웨어
Fig. 10 Curve fitting software by LabVIEW

표 1 파라미터 추출 결과

Table 1 The result of parameter extraction

	n	Isat(A)	Rsh(Ω)	Rs(Ω)	R ²
KYOCERA 130	1.1685	1.2573E-08	56.47	0.1526	0.9981
KYOCERA 200	1.1780	1.4665E-08	138.19	0.2015	0.9996
SANYO 190	1.0722	3.0496E-11	15000.00	1.9371	0.9992
SANYO 210	1.0064	7.3382E-12	6355.56	1.0705	0.9997
SUNTECH 20	1.2463	5.9204E-09	2214.29	1.3121	0.9971
SUNTECH 40	1.4526	2.1135E-07	733.73	0.5573	0.9977
KPE CELL	1.0912	1.0692E-11	2630.77	0.5953	0.9982

4. 결 론

본 논문에서는 태양전지 모델의 파라미터를 정확히 추출할 수 있는 단순하고도 강력한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 제조사에서 제공하는 I-V 커브 또는 실측 I-V 커브를 이용하여 태양전지의 파라미터를 용이하고 정확하게 추출할 수 있는 유용한 방법이다. 태양전지의 I-V 커브 데이터만으로 반도체의 물리적 특성으로부터 이상계수와 역포화 전류를 추출 하였고, 태양전지 방정식에서 직·병렬 저항성분을 배제한 이상적인 I-V 커브의 데이터를 구하였다. 이상적인 I-V 커브와 실측 I-V 커브의 차이는 직·병렬 저항에 의한 손실이 원인으로 이것을 이용하여 구해진 직·병렬저항 값은 특정 영역에서 계산된 값이 최적임을 다양한 제조사에서 만들어진 다양한 용량의 모듈 및 셀을 이용한 파라미터 추출 시험을 통해 증명하였다. 따라서 제안된 방법은 기존 방법과 달리 태양전지 방정식의 모

든 파라미터를 순차적으로 추출할 수 있는 차별화된 방법이다. 또한, 추출된 값을 이용하여 그려진 I-V 커브의 정확도가 매우 높음을 최소자승법을 이용한 데이터 스위트 상의 특성커브와의 비교를 통해 보였다. 제안된 태양전지 모델의 파라미터 추출방식은 태양전지 셀 또는 모듈의 출력특성을 정확히 모사하기 위한 모델 개발, 성능평가, 열화진단 그리고 새로운 MPPT 알고리즘의 개발 및 평가 등에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임

참 고 문 헌

[1] Bashahu M. and A. Hayarimana, "Review and test methods for determination of the solar cell series resistance", *Renewable energy*, 6, pp. 129-138, 1995.

[2] Amit Jain, Avinashi Kapoor, "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cell using Lambert W-function", *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 81, pp. 269-277, 2004.

[3] Amit Jain, Avinashi Kapoor, "A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using Lambert W-function", *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 85, pp. 391-396, 2005.

[4] Amit Jain, Avinashi Kapoor, "A new approach to study organic solar cell using Lambert W-function", *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 86, pp. 197-205, 2005.

[5] Aberle A., S.R. Wenham, M.A. Green, "A new method for accurate measurement of the lumped series resistance of solar cells", *23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 12, pp. 133-139, 1993.

[6] Z. Ouennoughi, M. Chegaar, "A simpler method for extracting solar cell parameters using the conductance method", *Solid-State Electronics* 43, 1999.

[7] Pallab Bhattacharya, "Semiconductor Optoelectronic Devices", *Prentice Hall*, pp. 174-175, 1994.

[8] S.M. Sze, "Semiconductor Devices Physics and Technology 2nd Edition", *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 109-113, 2002.

[9] Sima Dimitrijević, "Understanding Semiconductor Devices", *Oxford University Press*, pp. 155-159, 2000.

[10] Jasprit Singh, "Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 185-190, 2001.

[11] Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory 8th Edition", *Prentice Hall*, pp. 17-19, 2002.

[12] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 5, 2009.

저 자 소 개



김욱(金旭)
1981년 6월 10일생. 2008년 송실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



김상현(金尙鉉)
1981년 7월 14일생. 2008년 송실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



이종학(李鍾鶴)
1984년 7월 15일생. 2009년 송실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



최우진(崔宇鎭)
1967년 1월 7일생. 1990년 송실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1998년 (주)대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 송실대 전기공학부 조교수. 당 학회 국문지/JPE 편집위원.