

PV 모듈의 손실 저항 성분을 고려한 I-V 출력 모델링에 관한 연구

홍종경\*, 정태희\*, 류세환\*, 원창섭\*, 강기환\*\*, 안형근\*, 한득영\*  
 건국대학교 전기공학과\*, 한국에너지기술연구원\*\*

Modelling of I-V Characteristics of PV module with resistance variation.

Jong-kyung Hong\*, Tae-hee Jung\*, Se-Hwan Ryu\*, Chang-sub Won\*, Gi-Hwan Kang\*\*, Hyungkeun Ahn\* and Deuk-Young Han\*  
 Konkuk Univ. Korea Institute of Energy Research\*\*

**Abstract** - This paper, we proposed the theoretical model which includes series resistance  $R_s$  and shunt resistance  $R_{sh}$  of single-crystalline PV module and used numerical method based on physics. Series resistance  $R_s$  was derived from approach for p-n junction diode instead of established form obtained from the simulator with irradiance changes. Electrical output characteristics for PV modules to count the effect of  $R_s$  were then studied. Finally simulation results were compared to experimental data leading to good agreement.

1. 서 론

현재 무한한 에너지를 가지는 청정 에너지중 하나인 태양광을 이용한 발전의 비중이 높아지고 있다. 특히, 해마다 30% 이상의 증가율을 보이고 있으며, 지구환경 및 에너지 문제로 인해 더욱 관심을 받고 있다. 세계적으로도 현재 많은 연구가 진행되고 있고, 실용화가 많이 이루어진 가운데, 본 연구는 자체 제작한 이론적 모델링을 통해 PV(Photovoltaic) 모듈의 I-V 출력특성을 예상하고 또한 출력에 영향을 주는 파라미터중 하나인 저항성분  $R_s$ 와  $R_{sh}$  및 다이오드 재결합 전류를 고려하여 다이오드의 특성에 영향을 주는 factor  $n$ 이 PV 모듈의 I-V 출력에 미치는 영향에 대하여 알아보았으며, 실제 170W, 190W급 PV 모듈의 Sunsimulator를 통한 데이터와 비교하여 모델의 정확성을 검증하고, 추후 이 모델을 통해 PV 모듈의 I-V 출력특성을 분석하는 것을 목표로 두고 진행하였다.

2. 본 론

2.1 태양전지(Solar cell)

태양전지는 빛을 전기로 직접 바꾸어 주는 전자소자이다. 태양전지의 구조는 에미터인 n층과 베이스인 p층을 가지는 p-n접합 구조이다. 전기 에너지를 외부회로에 공급하는 과정을 보면 크게 두 과정으로 나눈다면, 첫째 태양광에 의해 태양전지 내에 전자-정공 쌍이 만들어지고 이는 보다 높은 에너지 상태로 이동하게 되고, 둘째 이러한 높은 에너지의 전자가 태양전지로부터 외부회로로 이동하게 된다. 이때 입사되는 광자의 에너지는 반도체의 대역폭보다 커야만 한다. 이러한 태양전지들을 직렬로 연결하여 제작하는 것을 PV 모듈이라 한다.

2.2 수학적 모델

이상적인 p-n접합의 전류식은 식(1)과 같다.

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

식(2)는 재결합 전류를 포함한 단일식으로 다이오드 factor  $n$ 을 넣었으며, 식(1)에 의해 유도된다. [1],  $n$ 은 1에서 2사이의 값을 갖는다. 그림 1은 p-n접합의 구조를 보여 주고 있다.

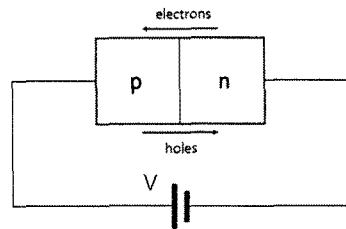


그림 1. p-n 접합

태양전지를 다이오드로 보면 빛에 의해 생성된 전류를  $I_L$ 로 정의하고, p-n 접합 다이오드의 전류-전압 특성에 중점을 시켜보면 그림 2와 같이 표현할 수 있다. [2]

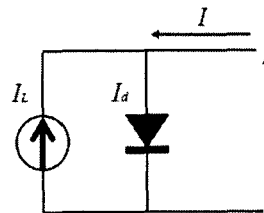


그림 2. Dark 상태의 태양전지 등가회로

식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I = I_d - I_L \quad (3)$$

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (4)$$

다이오드 식에서 살펴보면 광생성 전류의 방향은 역방향 이 되지만 태양전지에서는 이를 순방향으로 생각하여 식을 정의하므로 아래와 같다.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

로 나타낸다.

태양전지가 이상적인 경우 식(5)와 같이 나타나지만, 실제로는 태양전지 내부의 병렬저항  $R_{sh}$ 와 직렬저항  $R_s$ 가 존재한다. 병렬저항은 태양전지 내부의 누설 저항을 나타내고, 직렬저항은 외적인 저항요소이다.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

식(6)은 저항성분을 포함한 식으로 그림 3과 같은 등가회로를 갖는다. [3]

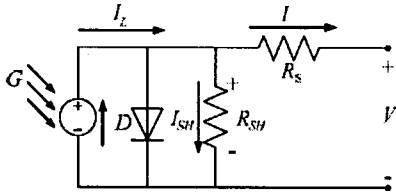


그림 3. 태양전지 등가회로

### 2.3 저항정의

그림 3의 등가회로에서 병렬저항  $R_{sh}$ 의 경우 태양전지 내부의 저항이 아닌 누설 손실 저항으로 정의 하고 다이오드 자체의 저항을  $r_d$ 로 정의 하여 PV 모듈의 전체 직렬저항  $R_s$ 를 유도하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$r_d = \frac{dV}{dI} = \frac{kT}{qI} = \frac{0.0257}{I[A]} \quad (7)$$

$$R_s = r_d \times Nc \quad (8)$$

식(8)의  $Nc$ 는 직렬 연결된 태양전지의 개수를 표현한다.

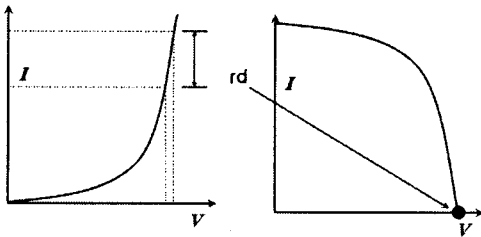


그림 4. 직렬저항  $R_s$  유도

### 2.4 측정 및 시뮬레이션

직렬저항  $R_s$  및 병렬저항  $R_{sh}$ 가 I-V 출력 특성에 미치는 영향 및 다이오드 factor  $n$ 에 의한 출력 변화를 알아보고, 실제 Sunsimulator를 통해 170W, 190W급 단결정 PV 모듈의 출력 결과와 비교하여 모델을 검증하였다.

$G[kW/m^2]$	$T[^\circ C]$	$I_{sc}[A]$	$V_{oc}[V]$	$I_{mp}[A]$	$V_{mp}[V]$	$P_{max}[W]$	$Nc$
1	25	5.19	44.3	4.78	36.1	172.27	72
1	25	7.78	32.4	7.4	25.8	191.03	54

표 1. 170W, 190W 단결정 모듈의 출력 파라미터

### 2.5 실험결과 및 고찰

그림 5에서는 태양전지 한 장의 저항 값에 대한 I-V 출력 특성 변화를 보여주고 있다. 직렬저항이 커질수록 출

력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

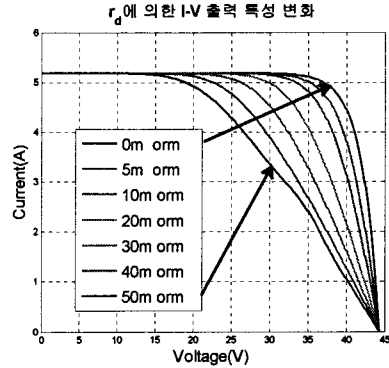


그림 5.  $r_d$ 에 의한 I-V 출력 특성 변화

그림 6은 병렬저항  $R_{sh}$ 에 의한 I-V 출력 특성을 보여주고 있으며, 병렬저항  $R_{sh}$ 의 값이 작아질수록 누설 전류가 많이 생기므로 출력이 감소하게 되는 것을 알 수 있다.

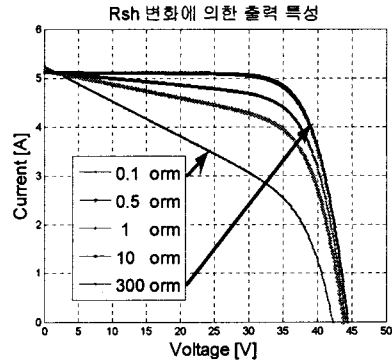


그림 6.  $R_{sh}$ 에 의한 I-V 출력 특성 변화

그림 7에서는 다이오드의 특성을 결정짓는 요소 중 하나인 factor  $n$ 의 크기가 증가 할수록 I-V 출력이 감소하는 것을 알 수 있다. ( $1 < n < 2$ )

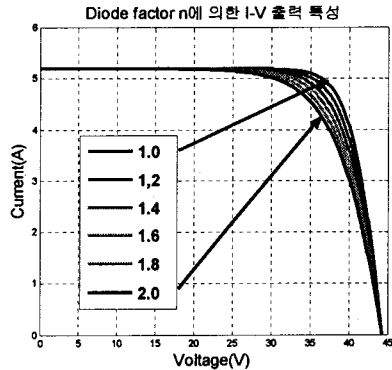


그림 7. Diode factor  $n$ 에 의한 I-V 출력 특성 변화

그림 8과 9는 Sunsimulator를 이용하여 측정한 170W, 190W급 단결정 PV 모듈과 실제 비교 분석한 데이터이다. 데이터의 출력 비교 분석 결과 2% 미만의 오차만을 가지는 정확한 모델이 되었다는 것을 확인할 수 있다.

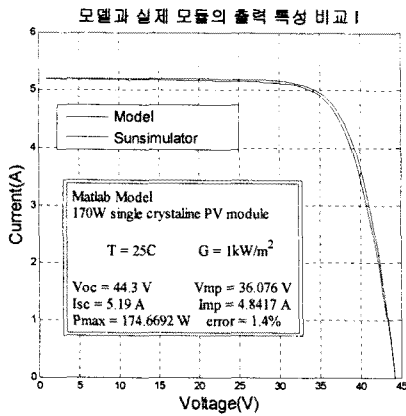


그림 8. 170W PV 모듈과의 출력 특성 비교

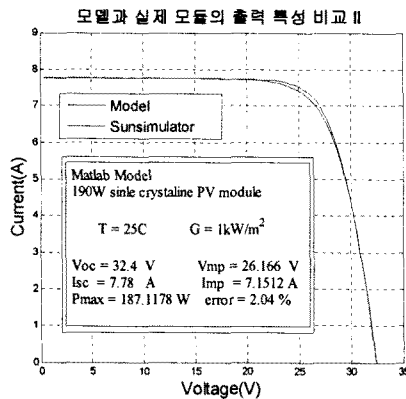


그림 9. 190W PV 모듈과의 출력 특성 비교

Sunsimulator의 경우 빛을 조사 시키면서 직렬저항  $R_s$ 를 0에서부터 무한히 증가시킴으로써 I-V 출력 특성 그래프를 얻는다. 반면 이론적 모델링의 경우 다이오드 식으로부터 지수함수 그래프를 얻는다. 하지만 결과적으로 두 데이터의 거의 정확한 일치를 확인 하였다. 이것은 이론적인 데이터로 PV 모듈의 출력특성에 대한 분석이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

연구를 진행하면서 직렬저항  $R_s$ 와 병렬저항  $R_{sh}$ , 그리고 다이오드 factor  $n$ 이 출력에 어떠한 영향을 주는지 알 수 있었으며, PV 모듈의 높은 출력을 위해서는 직렬저항  $R_s$ 를 최대한 작게,  $R_{sh}$ 를 최대한 높게 하여 제작해야 최고의 효율을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 그림 3의 직렬저항  $R_s$  대신 다이오드 내부의 저항을 하나의 저항으로 생각하여 직렬 연결된 개수를 카운터 하여  $R_s$ 로 정의하였다. 그 결과 2%미만의 오차를 갖는 출력 결과를 얻을 수 있었으며, 각 저항성분과 다이오드 factor가 출력에 어떠한 영향을 주는지 확인할 수 있었다.

제작된 모델은 실제 Sunsimulator로 측정된 모듈의 I-V 출력과 유사하다는 것을 검증하였고, 이를 통해 추후 PV 모듈의 출력 특성을 이론적으로 분석하는데 사용할 수 있을 것이라 생각한다.

[1] 이재형, 임동건, 이준신, "태양전지 원론", 홍릉과학 출판사, 2005  
 [2] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, "applied PHOTOVOLTAICS", EARTHSCAN, 2007  
 [3] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model", Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAust, Vol. 21, No. 1, p. 49-56, 2001.  
 [4] J. A. Gow, C. D. Manning "Development of a photovoltaic array model for use in powerelectronics simulation studies", IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, p.193-200, 1999.