

부분 음영에 따른 a-Si Thin Film Photovoltaic(PV) Module의 직렬저항변화

신준오¹, 정태희¹, 김태범¹, 우성철¹, 윤나리¹, 강기환², 한득영¹, 안형근^{1,a}

¹ 건국대학교 전기공학과

² 한국에너지기술연구원

Series Resistance Change by Partial Shading in a-Si Thin Film Photovoltaic(PV) Module

Jun-Oh Shin¹, Tae-Hee Jung¹, Tae-Bum Kim¹, Sung-Chul Woo¹, Na-Ri Yun¹,
Ki-Hwan Kang², Deuk-Young Han¹, and Hyung-Keun Ahn^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

² Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received August 13, 2010; Revised September 24, 2010; Accepted October 18, 2010)

Abstract: PV module has many power loss factors, and series resistance is the most important elements of them. It is therefore easy to expect the partial shading decrease the lifetime of the semiconductor depletion layer in thin film PV module. Different shading losses could be related with the hot spot which is critical in expecting the reliability issue. In this paper we have modelled the series resistance of the PV module with both different direction of the cell line and shading area of the panel. From the results, thin film a-Si PV module has shown different properties by shading direction.

Keywords: Shading, Sheet resistance, Series resistance, Resistivity, I_{sc} , V_{oc}

1. 서 론

박막 태양전지 모듈은 제조공정상의 문제점 혹은 음영과 같은 환경요인에 의한 여러 가지 손실 요소가 존재하며 그에 따라 발생하는 전기적 출력 감소가 모듈에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 특히 박막 태양전지 모듈은 하나의 대면적 Panel에 다수의 셀을 직렬연결시킴으로써 저항 변화에 민감하여 매우 취약한 면을 갖고 있다 [1]. 논문에서 다루게 될 직렬 저항은 물질사이의 접촉, 도핑층, 전극에 의해 발생할 수 있으며, 특히 Building Integrated Photovoltaic (이하 BIPV)로의 활용도가 높은 박막모듈은 결정질 모듈과 비교하여 음영에 의한 직렬저항의 변화 추세가

단순히 면적에 선형적이지 않아 모듈의 출력손실을 예측하는데 있어 어려움이 있다.

본 논문에서는 a-Si 박막 태양전지모듈의 음영효과를 통해 모듈의 직렬저항과 출력특성 변화를 확인하고 국부적인 음영에 의한 실험 자료를 바탕으로 반도체 내부 직렬저항을 모델링함으로써, 일정 면적 이상의 음영이 발생하는 경우에 대해 실제 현장에서 나타날 수 있는 음영 형태에 따른 출력변화를 예측하였다.

2. 실험 방법

실험은 A社 Single Junction a-Si : H 박막 태양전지 모듈 (5세대 Glass)을 사용하였으며 AAA 등급

Table 1. Initial value of a-Si thin film PV module.

| Parameter | Value |
|-----------------------------|----------|
| Isc (Short circuit current) | 1.813 A |
| Voc (Open circuit voltage) | 98.63 V |
| Maximum Power (Pmax) | 121.38 W |
| Fill Factor (F.F) | 67.88% |
| Efficiency (Eff.) | 8.36% |

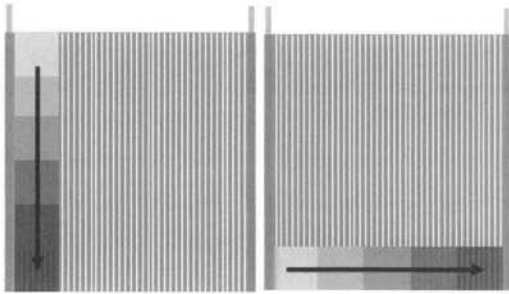


Fig. 1. Shading area change.

Pulse type의 모듈 시뮬레이터를 이용하여 측정한 초기 측정값은 아래 표 1과 같다.

음영에 의한 직렬저항의 변화를 알아보기 위하여 A社 모듈 24 cell 기준 (전체 120 cell)으로 그림 1의 좌측과 같이 3.2~19% 음영 면적을 세로 방향으로 증가시키며 직렬저항을 측정하였고, 이와 같은 방식으로 그림 1의 우측과 같이 3.3~16.7% 음영 면적을 가로 방향으로 증가시키며 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

가로/세로 방향으로 음영 면적을 약 3.3%씩 증가시켰을 경우 I-V curve는 아래 그림 2, 3과 같으며 그림 4는 셀 전체를 가리기 전인 세로방향으로 0~15.8% shading했을 때의 Rs 변화추세이다. Isc는 세로방향의 경우 유효면적이 감소함에 따라 선형적으로 감소하고 가로방향의 경우 최초 음영 이후 적은 감소율을 보인다.

Pmax 또한 유사한 경향을 보이지만 직렬저항 Rs의 경우 그림 4와 같이 셀 전체를 가리기 전인 15.8%

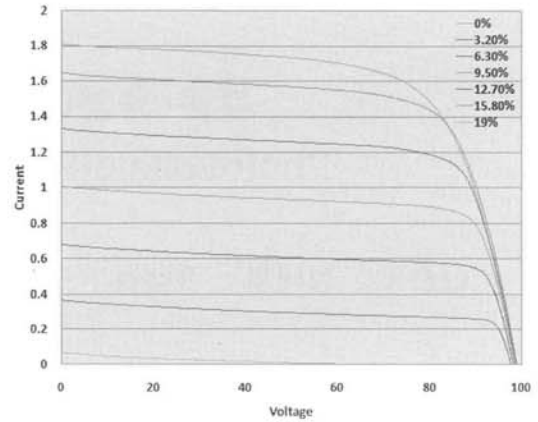


Fig. 2. I-V Curve by vertical shading.

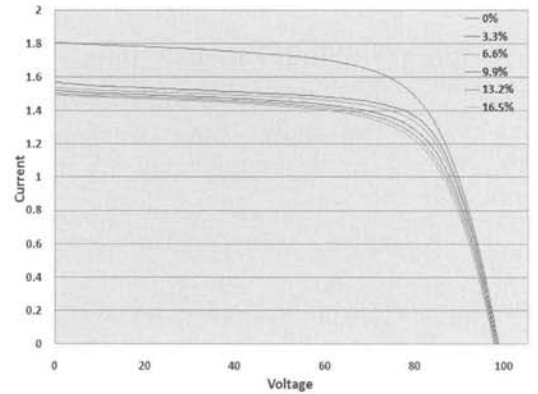


Fig. 3. I-V Curve by horizontal shading.

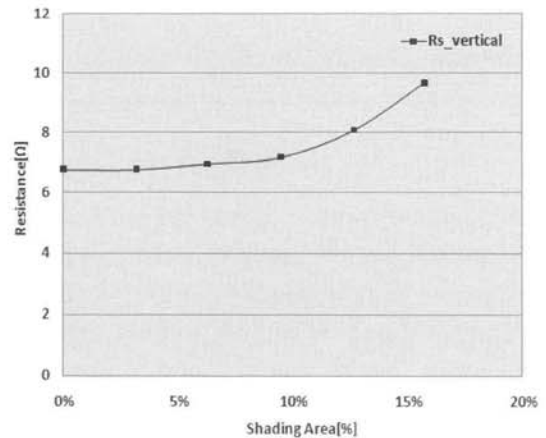


Fig. 4. I-V Rs change of vertical 0~15.8% shading.

를 가리는 동안 비선형적으로 증가하는 점을 알 수 있다. 가로/세로 방향 음영에 의한 Isc 감소율은 그림 5와 같이 세로방향에서 큰 차이를 보이는 반면 [7]

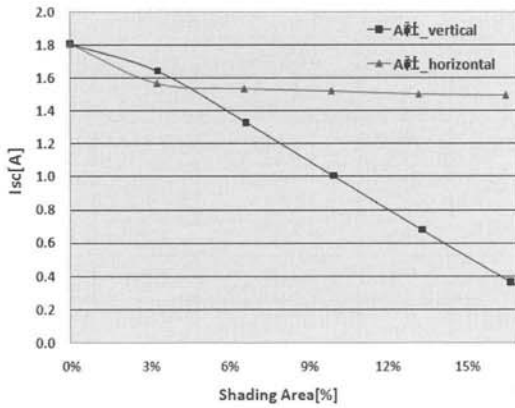


Fig. 5. I-V Isc change of vertical / horizontal shading.

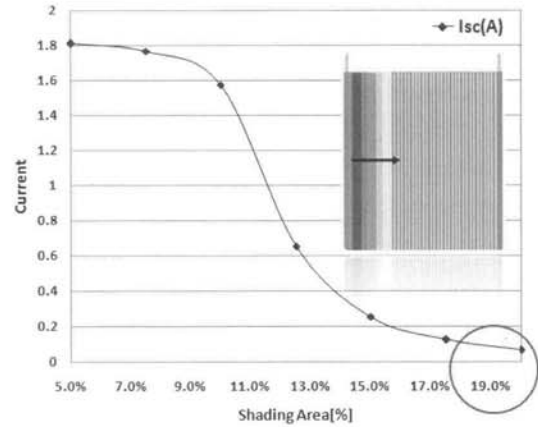


Fig. 6. Resistivity calculation base.

Voc의 경우 그림 2, 3과 같이 면적과 방향에 따른 변화율은 적은 편이다.

3.2 이론적 접근 및 모델링

박막 태양전지 모듈의 p/i/n 및 전극 각 층은 매우 얇게 증착되어있으며 그 모듈을 합쳐도 2 um 내외의 두께를 가진다. 따라서 본 논문에서는 Sheet Resistance를 통해 박막 태양전지의 저항 성분 중 Si layer의 준중성 영역 내 고유저항에 의한 직렬저항 변화를 모델링하였다. 면저항은 두께-T, 폭-W (1376 mm), 길이-L (1075 mm)을 갖는 직육면체에서 저항률 ρ를 두께-T로 나눈 ρsheet와 폭, 길이의 비이며 식 (1)과 같이 표현 된다 [2].

$$R_{sheet} = \rho \frac{L}{WT} = \frac{\rho}{T} \frac{L}{W} = \rho_{sheet} \frac{L}{W} \tag{1}$$

다음 식 (2)는 직병렬 저항성분을 포함한 태양전지의 전류식이며 [3, 4], 기존 직렬저항 중 접촉/온도/전극에 의한 요소를 배제하고 반도체 내부저항만을 고려한 $R_s = R_{sheet}$ 로 대체하였다.

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

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{q(V + IR_{sheet})}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_{sheet}}{R_{sh}} \tag{2}$$

초기측정값 R_0 와 아래 식 (3)을 이용하여 발전 영

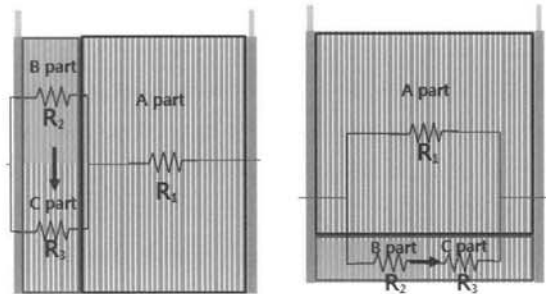


Fig. 7. Series/parallel resistance composite.

역 A의 비저항 ρ_G 을 구하고, 그림 6과 같이 음영 면적을 증가시켜 거의 전류가 흐르지 않는 시점에 측정된 저항값을 기준으로 비발전 영역 B의 비저항 ρ_{NG} 를 산출하였다. 그림 7은 잔류발전 셀과 음영 셀을 직병렬 연결된 부하로 가정하였을 때 박막모듈의 직렬저항을 전기회로적인 측면에서 접근한 모델이다.

다음 식 (4), (5)는 모듈의 가로길이를 폭 W, 세로 길이를 길이 L로 놓았을 때 식 (3)의 비저항을 이용하여 최종 저항 R_s 를 도출하는 과정이다.

$$\rho_G = R_0 \times \frac{W_0}{L_0}, \quad \rho_{NG} = R_2 \times \frac{WR_2}{LR_2} \tag{3}$$

$$R_1 + \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = R_{total} = R_{s1} \tag{4}$$

$$\frac{R_1 \times (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = R_{total} = R_{s1} \tag{5}$$

3.3 Modeling을 통한 R_s 예측

식 (3), (4), (5)를 이용하여 음영 면적을 가로/세로 방향으로 가변한 모듈의 저항을 계산하고, 시뮬레이터를 이용하여 측정된 실제 모듈의 R_s 값과 비교한 값은 다음 표 2, 3과 같다.

표 2에서 확인할 수 있듯이 가로방향의 음영은 면적에 비례하여 R_s 가 선형적으로 증가하며 계산값과 $\pm 1\%$ 이내의 오차를 가짐으로써 비교적 잘 일치함을 보여준다. 하지만 표 3에서 볼 수 있듯이 세로방향 음영의 경우 1st 계산값은 음영 면적이 증가할수록 측정값과 큰 오차를 보인다. 이는 C영역의 잔여 발전 셀에 형성되는 전계의 세기가 유동적임을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 1st 계산값은 이러한 드리프트전류의 증가에 따른 저항의 감소를 고려하지 않은 값으로써 초기 저항값 R_0 일 때의 캐리어 드리프트 속도를 기준으로 각각의 변화율에 대해 보상해줌으로써 최종 2nd 계산값을 산출하여 보정할 수 있다.

면저항 R_{sheet} 와 관련하여 비저항 ρ_G, ρ_{NG} 는 캐리어 드리프트와 밀접한 요소이다. 그림 7에서 음영이 포함되지 않은 정상 셀 A영역을 전력공급원으로 보았을 때, 음영 셀에 형성되는 전계의 변화에 의한 드리프트 전류 J_{drift} 와 드리프트 속도 v_d 의 관계는 다음 식 (6), (7)과 같다. 여기서 ρ 는 비저항이다 [5].

$$v_d = \mu E, E = \rho J \tag{6}$$

$$\therefore v_d = \mu \rho J$$

$$J_{drift} = J_{N|drift} + J_{P|drift} = q(p+n)v_d \tag{7}$$

B면적의 확장으로 인한 B, C 사이의 전위차는 전계를 증가시키고 식 (6), (7)을 통해 알 수 있듯이 전계 E 는 드리프트 전류 J_{drift} 를 증가시킨다. 표 3의 1st 계산값은 모듈의 초기 저항값 및 I_{sc} 가 0에 가까운 19% 세로방향 음영 시 비저항을 기준으로 산출한 값으로써 이때의 드리프트 속도가 기준이 된다. 실험에서 음영 면적 변화로 각 단계의 전위차가 점점 커지고 그에 따른 드리프트 속도는 증가하는데, 표 3에서 R_1 은 초기 v_{d0} 와 J_0 에 의한 저항이며 실제 드리프트 전류 J_1 은 R_1/R_0 의 저항비 α_0 만큼 증가하게 된다.

$$\frac{R_1}{R_0} = \alpha_0, \frac{R_2}{R_1} = \alpha_1, \dots, \frac{R_6}{R_5} = \alpha_5 \tag{8}$$

Table 2. R_s comparison by horizontal shading.

| Area | R_s | Measure | Calculation | |
|-------|----------|---------|-------------|------------|
| | | | 1st | error rate |
| 0% | R_0 | 6.914 | 1st | |
| 3.3% | R_{s1} | 7.160 | 7.117 | -0.6% |
| 6.6% | R_{s2} | 7.266 | 7.321 | 0.75% |
| 9.9% | R_{s3} | 7.461 | 7.524 | 0.84% |
| 13.2% | R_{s4} | 7.687 | 7.727 | 0.51% |
| 16.5% | R_{s5} | 7.930 | 7.930 | 0% |

Table 3. R_s comparison by vertical shading.

| Area | R_s | Measure | Calculation | | |
|-------|----------|---------|-------------|---------|------------|
| | | | 1st | 2nd | error rate |
| 0% | R_0 | 6.774 | 1st | 2nd | |
| 3.2% | R_{s1} | 6.776 | 7.031 | 6.975 | 2.93% |
| 6.3% | R_{s2} | 6.967 | 7.416 | 7.249 | 4.05% |
| 9.5% | R_{s3} | 7.185 | 8.058 | 7.649 | 6.46% |
| 12.7% | R_{s4} | 8.093 | 9.340 | 8.283 | 2.35% |
| 15.8% | R_{s5} | 9.683 | 13.178 | 9.447 | -2.44% |
| 19% | R_{s6} | 2142.67 | 2142.67 | 2142.67 | 0% |

$R_1 = \alpha_0 R_0, R_2 = \alpha_1 R_1, \dots, R_6 = \alpha_5 R_5$ 이므로 첫 번째 계산값 R_1 을 아래 식 (9)와 같이 B영역의 저항증가를 α_0 로 나눠주면

$$R_1 = \frac{V_1}{J_{drift1}} \Rightarrow \frac{V_1}{\alpha_0 \cdot J_{drift1}} = \frac{R_1}{\alpha_0} \tag{9}$$

과 같다. J_{drift} 를 보정한 값은 아래 그림 8과 같으며 1st 계산값 대비 측정값과 비교적 근사한 값을 가진다. 하지만 2nd 계산값 또한 음영 면적이 증가하면서 오차가 커질 수 있음을 그래프 상에서 예측할 수 있다. 그림 6의 좌측 모델과 같이 B영역의 음영 면적이 세로방향으로 확대됨에 따라 A영역의 v_d 는 전계 E 와 비례해 증가하고 드리프트 전류 J_{drift} 도 증가하게 된다. A영역의 J_{drift} 증가는 저항 R_s 의 감소로 이어지지만 임계영역 이후에 포화되는 경향을 보인다. 낮은 전기장에서 v_d 는 전기장에 비례하지만, 높은 전기장에서 v_{sat} 로 대체되고 전계 E 에 독립적이다 [6]. 드리프트 속도 v_d 는 저전계일 때 전계의 세기에 비례하지만 높은 전계에서는 포화되기 때문에 일정 면적 이상

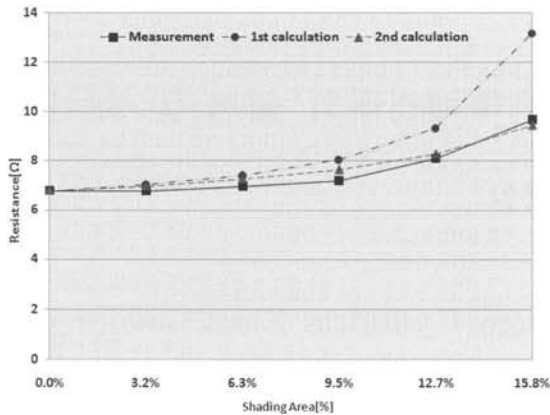


Fig. 8. R_s calculation and measurement in the vertical direction.

이 가려지는 시점부터 임계점의 v_d 와 근접한 값을 적용해야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 a-Si 박막 태양전지 모듈의 음영 면적에 따른 출력특성과 면저항의 변화율을 통해 직렬 저항을 예측하였다. 실제로 박막 모듈은 음영 조건에서 비발전 영역이 Cell 전체일 경우 출력특성을 가장 악화시키고 국소적인 영역일 경우 세로방향의 음영에 취약한 특징을 보인다. 더구나 결정질에 비해 내구성이 취약한 박막모듈의 특성상 역바이어스 전류 증가로 인해 hot spot과 같은 열 형태의 손실로 구조적 파괴에 이를 수 있다는 점에서 더욱 중요하다고 볼 수 있겠다 [8]. 모델링 결과에서 ρ_{NG} 는 모듈 전체 면적의 19% 즉, I_{sc} 가 거의 0에 가까운 상태를 기준으로 산출한 값으로써 그림 8에서 확인할 수 있듯이 세로방향의 음영일 경우 일정 면적 이상에서 비교적 정확한 예측이 가능하며 모듈 각각의 특성에 따라 다르다는 한계성을 지닌다. 하지만 논문에서 제시한 방법을

통해 간접적으로 음영에 의한 직렬저항을 예측할 수 있는 점은 출력손실분석에 관한 충분한 가능성을 보여준다고 할 수 있겠다. 추후 본 논문을 토대로 모듈의 역바이어스 전류 특성분석을 통해 보다 다양한 경우에서 정확한 출력감소량 예측과 오차를 줄일 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No : 2009T100100579)

REFERENCES

- [1] A. Johansson, R. Gottschalg, D.G. Infield, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (Osaka, Japan, 2003).
- [2] Ruhi KAPLAN and Beng"u KAPLAN, Turk J Phys. 26, 460, (2001).
- [3] D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez, (IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE, June 4-7, 2007) pp.2392-2396.
- [4] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, R. Corkish, "APPLIED PHOTOVOLTAICS", (Earthscan Publications, 2007).
- [5] Deuk-Young Han, "Electromagnetism", (INTERVISION, 2000), p182.
- [6] Robert F. Pierret, "Semiconductor Device Fundamentals, (Addison Wesley, 1997), p78.
- [7] A. Al Tarabsheh, M. B. Schubert and J. H. Werner, (ICEGES, Nov 2009).
- [8] E. Molenbroek, D.W. Waddington, K.A. Emmery, (IEEE, 1991) pp. 547-552.