

# 태양전지의 전기적인 출력특성이 태양전지모듈에 미치는 영향

김승태\*, 강기환\*\*, 박지홍\*, 안형근\*, 유권종\*\*, 한득영\*

\*건국대학교 대학원 전기공학과(hkahn@konkuk.ac.kr)

\*\*한국에너지기술연구원 태양광발전센터(ghkang@kier.re.kr)

## The Effects of PV Cell's Electrical Characteristics for PV Module Application

Kim, Seungtae\*, Kang, Gi-Hwan\*\*, Ahn, Hyungkeun\*, Han, Deuk-Young\*, Yu, Gwon-Jong\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(hkahn@konkuk.ac.kr),

\*\*Photovoltaic Research Center, Korea Institute of Energy Research(ghkang@kier.re.kr)

### Abstract

---

In this paper, we study The Effects of PV Cell's Electrical Characteristics for PV Module Application. Photovoltaic module consists of serially connected solar cell which has low open circuit voltage and high short circuit current characteristics. The whole current flow of PV module is restricted by lowest current of one solar cell. For the experiment, we make PV module composing the solar cells that have short circuit current difference of 0%, 1%, 3% and Random. The PV module exposed about 35days, its the maximum power drop ratio was 4.282% minimum and 6.657% maximum. And PV module of low current characteristics has electrical stress from other modules. The solar cell temperature of PV module was higher compared to PV cell. To prevent early degradation, it is need to have attention to PV cell selection.

Keywords : 태양전지(Photovoltaic cell), 태양전지모듈(Photovoltaic module), 최대출력(Pmax, Maxium power), 단락전류(Isc, Short circuit current), 개방전압(Voc, Open circuit voltage)

---

## 기 호 설 명

$P_{max}$	: 최대 출력 [W]
$I_{sc}$	: 단락 전류 [A]
$V_{oc}$	: 개방 전압 [V]
$I_{mp}$	: 최대 출력 동작 전류 [A]
$V_{mp}$	: 최대 출력 동작 전압 [V]

## 1. 서 론

지구온난화의 심각성으로 기후 변화에 관한 국제 연합 기본 협약(UNFCCC : The United Nations Framework Convention on Climate Change)과 이보다 구속력이 있는 교토기후협약(Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change 또는 교토의정서, 2008년 5월 기준 총 184개국 서명, 76개국 비준)의 발효에 의해 신·재생에너지의 관심과 필요성이 날로 높아지고 있다. 화석연료의 고갈에 대비한 친환경적이고 지속가능한 에너지원으로써 신·재생에너지의 연구 및 보급은 절실하다. 재생에너지 중 공해가 없는 태양광발전시스템은 무한한 에너지원인 태양 빛에너지를 이용하여 유지·보수가 거의 필요 없고 20년 이상 사용 가능한 친환경적인 발전시스템으로 각광받고 있다. 매우 중요하다. 이와 같은 상황을 반영하듯 태양전지의 생산량은 1999년부터 2007년까지 매년 47%이상 증가하고 있으며, 2007년에는 4,279MW를 생산함으로써 2006년 생산량 2,536MW 대비 약 69%인 역대 최대 증가율을 나타냈다.

태양광발전시스템은 크게 태양전지모듈(Photovoltaic Module), 태양광발전용 PCS(Power Conditioning System), 주변장치(BOS : Balance Of System)등으로 구성한다. 이 중에서 태양전지모듈은 태양광발전시스템의 수명을 결정짓는 가장 큰 비중을 차지하며, 태양광발전시스템의 핵심인 태양전지를 외부에 설치했을 때 외부환경(온도, 습

기, 눈, 비, 바람, 우박 등)에서 파손 및 부식을 방지하고 수명을 연장시키며 설치장소 및 용도에 따라 설치하기 용이하게 설계된다. 태양전지의 낮은 전압, 높은 전류 특성으로 태양전지모듈은 태양전지를 수십장 직렬 연결한 것이다.

본 논문에서는 각각 태양전지의 전기적인 출력특성이 태양전지모듈에 미치는 영향에 관해 연구한 것이다.

## 2. 태양전지의 발전원리

태양전지는 실리콘 등의 반도체 소자가 빛 에너지를 받아서 전기에너지로 변환되는 특이인 광기전력 효과(Photo Voltaic Effect)와 광전류 효과(Photocurrent Effect)를 이용하는 다이오드접합(Diode Junction) 구조를 갖는 반도체 소자이다. 가장 널리 사용되는 실리콘 태양전지의 구조를 예로 들면 그림 1과 같이 주기율표 상 4가 원소(규소:Si)에 5가 원소(P:인, As:비소, Sb:안티몬 등)를 첨가시킨 n-type 반도체와 3가 원소(B:붕소, K:칼륨 등)를 첨가시킨 p-type 반도체를 접합시켜 p-n 접합 다이오드 형태인 태양전지가 만들어진다.

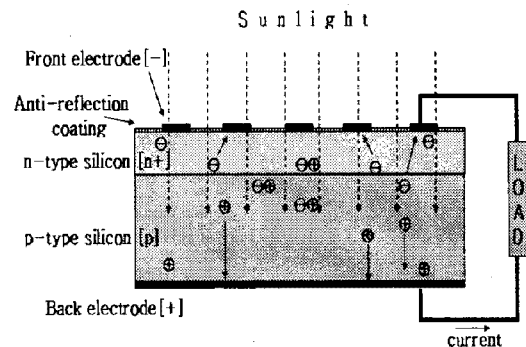


그림 1. 태양전지 발전원리

이렇게 p-n 접합이 이루어지면 불순물의 농도차에 의해 n-type 반도체에서 높은 농도의 전자(Electron)가 p-type 반도체로 확산되어 가고 동시에 p-type 반도체에서는 정공(Hole)이 n-type 반도체로 확산된다. p-type 반도체로 확산된 전자는 전도대(Conduction

Band)에서 에너지가 n-type 반도체 내의 전자보다 높고, 반면에 n-type 반도체로 확산된 정공의 에너지는 가전자대(Balance Band)에서 p-type 반도체의 정공에 비하여 에너지가 높아짐으로 내부전위차가 형성된다. 이때 금지대폭(Energy Gap)이상의 에너지를 갖는 광자(Photon)가 태양전지 내에 인입되면 광흡수 층인 n-type(또는 p-type) 반도체에 흡수되면서 가전자대의 전자를 여기시켜 전도대로 이동시키고 가전자대에는 전자를 잃은 정공이 생성된다. 이를 전자-정공쌍(Electron-Hole Pair)이라 하는데, 이 전자-정공쌍이 내부의 소수전하(Minority Carrier)의 농도차를 발생시키고 이러한 전하들은 새로운 확산력에 의해 광기전력을 발생한다.

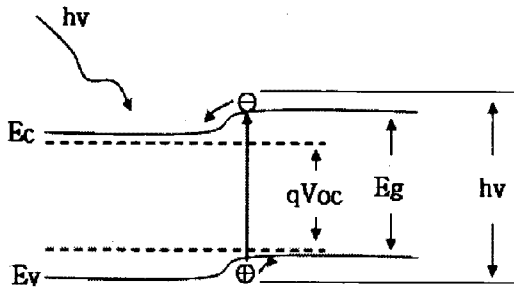


그림 2. 에너지밴드 다이어그램

이때 p-n 접합 양단 전극에 외부의 도선을 연결시키면 n-type 반도체에는 전자가, p-type 반도체에는 정공이 외부 도선으로 흐르게 된다. 그러므로 태양전지에서 발생한 전류의 흐름은 p-type 반도체에서 외부도선을 통해 n-type 반도체로 흘러 들어가게 된다.

태양전지의 등가회로는 그림 3과 같다. 태양빛이 입사된 태양전지는 광전류  $I_{ph}$ 를 생성하고 최종 전류  $I$ 는 다이오드에 걸리는 전류  $I_D$ 와 병렬저항에 걸리는 전류  $I_{sh}$ 를 빼준 값이 된다. 즉 식 (1)이 된다.

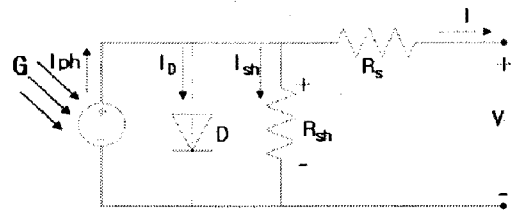


그림 3. 태양전지 등가회로

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

그리고 식 (1)을 자세히 풀어 쓰면 식 (2)와 같다.

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(V + I \times R_s)}{n \times k \times T} - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right] \quad (2)$$

- $I_{ph}$  : 광전류[A]
- $I_0$  : 역포화전류[A]
- $R_s$  : 직렬저항[Ω]
- $R_{sh}$  : 병렬저항[Ω]
- $T$  : 절대온도[K]
- $n$  : 다이오드지수
- $q$  : 전하량( $1.6 \times 10^{-19}$ )
- $k$  : 볼츠만상수( $1.38 \times 10^{-23}$ )

여기서 태양전지의 이상조건 ( $R_s = 0, R_{sh} = \infty$ )에서 단락전류  $I_{sc}$ 와 개방전압  $V_{oc}$ 를 구하면 식 (3), (4)와 같다.

$$I_{sc} \cong I_{ph} \quad (\because V=0) \quad (3)$$

$$V_{oc} = \left( \frac{n \times k \times T}{q} \right) \times \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\because I=0) \quad (4)$$

태양전지의 전류식을 간단히 하기 위해 식 (5)와 같이 치환한다.

$$A = \frac{q}{n \times k \times T} \quad (5)$$

일반적인 실리콘 태양전지의 경우  $R_{sh} \gg R_s$  이므로 병렬저항  $R_{sh} = \infty$ 로 가정할 수 있다. 식 (2)는 같이 간략화 된다.

$$I = I_{ph} - I_s [\exp(A(V + I \times R_s)) - 1] \quad (6)$$

태양전지의 최대출력전력  $P_{mpp}$ 는 최대출력전류  $I_{mpp}$ 와 최대출력전압  $V_{mpp}$ 의 곱으로 정의된다.

$$P_{mpp} = I_{mpp} \times V_{mpp} \quad (7)$$

이는 태양전지에 연결된 부하의 크기를 제어함으로 최대출력 동작점(MPP : Maximum Power Point)에서의 전력  $P_{mpp}$ , 전류  $I_{mpp}$ , 전압  $V_{mpp}$ 이다. 또한, 부하에서 소비되는 전력  $P_{out}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= I \times V \\ &= (I_{ph} - I_s [\exp(A(V + I \times R_s)) - 1]) \times V \end{aligned} \quad (8)$$

최대출력 동작점에서  $dP_{out}/dV = 0$ 이므로  $I_{mpp}$ 와  $V_{mpp}$ 를 구하면

$$\begin{aligned} I_{mpp} &= \frac{(I_{ph} + I_s) \times V_{mpp} \times A}{1 + V_{mpp} \times A} \quad (9) \\ V_{mpp} &= V_{oc} - \frac{1}{A} \ln \left( \frac{V_{mpp}}{A} + 1 \right) \end{aligned}$$

태양전지에서 곡선인자(F.F : Fill Factor)은 다음과 같이 정의된다.

$$F.F = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \times 100 (\%) \quad (10)$$

또한, 변환효율은 입사전력에 대한 최대출력 전력의 비로 정의된다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{mpp}}{P_{input}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{P_{input}} \quad (11) \\ &= \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{P_{input}} \times F.F \end{aligned}$$

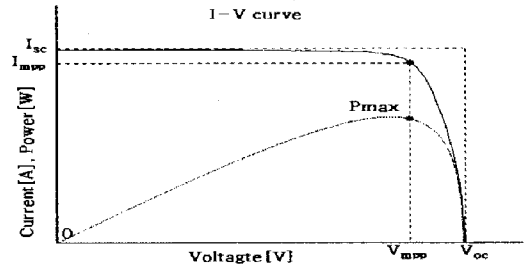


그림 4. 태양전지 전류-전압 곡선 특성

### 3. 태양전지모듈의 전기적인 특성

태양전지모듈을 구성하는 태양전지는 낮은 전압(약 0.6V) 특성을 갖기 때문에 수십 장을 직렬로 연결하여 구성한다. 직렬로 연결되어 있기 때문에 높은 전압을 얻을 수 있지만, 그 중 하나의 태양전지라도 낮은 전류 특성을 가진다면 나머지의 태양전지도 낮은 전류 특성을 따라가게 되고 결과적으로 출력도 낮아지게 된다. 그러한 전기적인 합성 원리를 살펴보면 그림 5 및 그림 6과 같다.

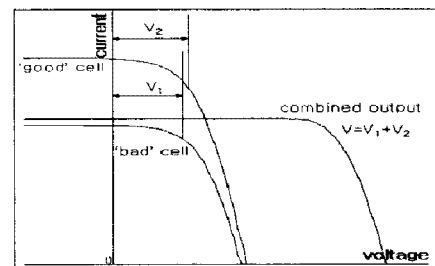


그림 5. 직렬 연결된 미스매치 태양전지의 합성 전압

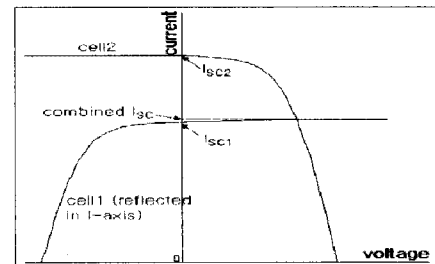


그림 6. 직렬 연결된 미스매치 태양전지의 합성 전류

합성전압은 그림 1과 같이  $V_1$  과  $V_2$  의 합

으로 구성되는데, 합성전류는 그림 3.4와 같이 높은 전류와 낮은 전류 특성을 갖는 태양전지의  $I-V$  특성 그래프  $I$ (전류)축을 기준으로 낮은 전류 특성을 갖는 태양전지의  $I-V$  특성 그래프를 대칭이동 시켜준 후에 낮은 전류 특성을 갖는 태양전지의  $I-V$  특성 그래프를 연장시켰을 때, 그때의 교차점이 태양전지 모듈의 합성전류( $I_{sc}$ )가 된다. 즉,  $V_1 + V_2 = 0$  일 때이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 실험장비

i) Light I-V 측정 : PasanIIIb A급 SunSimulator, 측정가능 모듈 사이즈 2m×2m, 방사안정도 ±2%, 방사균일도 ±2%로 STC(Standard Test Condition)조건에서 측정[AM 1.5, 25 °C, 1 kW/m<sup>2</sup>]

ii) TC 센서 온도 측정 :

GRAPHTEC midi LOGGER GL450

##### 4.2. 태양전지모듈 제작 시 발생하는 전류 편차

실험을 위해 다음과 같은 4가지의 조건으로 태양전지모듈을 제작했다.

- i) 태양전지의 단락전류 편차 0%
- ii) 태양전지의 단락전류 편차 1%
- iii) 태양전지의 단락전류 편차 3%
- iv) 태양전지의 단락전류 편차 Random

##### 4.2.1. 온도변화 및 전기적인 출력 특성

태양전지모듈 제작업체에서는 iv와 같은 방법으로 태양전지모듈을 제작하고 있다. 이에 따른 문제점으로는 태양전지모듈이 대면적, 대용량이 되면서 태양전지모듈의 내부 배열에서 미스매치에 의한 전기적인 영향이 발생하기 때문이다. 내부 배열은 대부분 직렬연결 되기 때문에, 전압의 편차 보다는 전

류에 의한 편차가 태양전지모듈의 수명을 좌우하기 때문이다. 이번 실험을 통해서 태양전지모듈 내부의 태양전지의 단락전류 편차에 따른 노화의 진행 속도를 비교해 볼 수 있다.

단락전류의 편차는 각각 태양전지 23장에 대한 1장의 편차가 0%, 1%, 3%이며, Random으로 제작된 태양전지모듈은 최대 편차는 5.12%, 평균 편차는 2.62%이다. 또한, 단락전류 편차가 다른 태양전지의 온도 변화를 측정하기 위해 각각 태양전지모듈에 6개의 TC센서를 부착했으며, 온도 변화는 08시부터 18시까지 10시간, 35일 동안 측정했다.

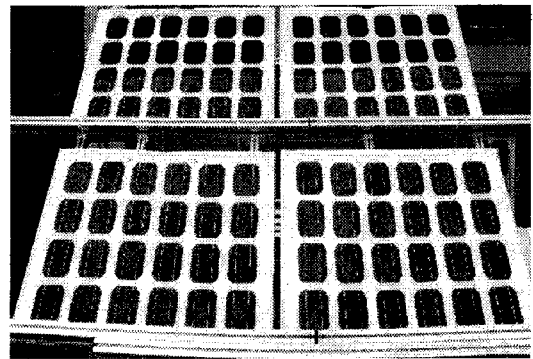


그림 7. 옥외 실험

표 1에 나타나 있듯이 단락전류의 편차가 클수록 태양전지의 열점(hot-spot)현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 이는 식 (12)에 나타나있는 전력손실과 관계가 있다.

$$\text{전력손실 } P = I^2 \times R \quad (12)$$

즉, 단락전류의 차이에 의해 낮은 단락전류 특성의 태양전지는 상대적으로 저항성분으로 작용하며 단락전류의 차이에 해당하는 전류의 공급의 곱과 비례하는 손실을 발생하고 이는 열로서 방출하게 된다. 표 1에서 단락전류의 편차가 3%인 태양전지모듈의 경우에 주위의 다른 태양전지보다 약 5°C가 높게 측정됐다. 반면 단락전류 편차가 0%인 모듈의 경우에는 고르게 분포했지만, 단락전류 편차

가 1%인 모듈은 주위의 다른 태양전지보다 약 2°C가 높게 측정됐다. 그리고 단락전류의 편차를 Random인 태양전지의 모듈의 경우에는 비교적 고르게 분포했다고 볼 수 있지만, 전체적으로 다른 태양전지모듈에 비해 평균 온도가 높게 나타났다. 이는 태양전지의 온도가 높으면 출력 값이 낮아지는 특성에 의해 태양전지모듈의 전체 출력을 저하시키는 요인으로 작용한다.

표 1. 태양전지모듈 온도 분포

	3:1	2:2	3:3	2:4	3:5	2:6
0%	42.9°C	45.8°C	45.9°C	43.8°C	45.6°C	43.5°C
1%	44.3°C	44.1°C	43.8°C	44.5°C	46.5°C	43.8°C
3%	45.9°C	46.5°C	46.4°C	46.5°C	52.0°C	47.1°C
Random	48.3°C	46.9°C	47.8°C	45.6°C	45.9°C	47.1°C

태양전지모듈은 온도에 민감하게 반응하는 발전 소자이다. 그렇기 때문에 대한민국에서 발전량이 가장 좋은 때도 일사량이 좋은 여름철보다 날씨가 선선한 봄과 가을인 것이 그러한 이유에서이다. 그리고 태양전지모듈에서 부분적으로 열점현상이 발생한다면 그 태양전지는 주변의 다른 태양전지에 의해 전기적인 스트레스와 열적인 스트레스가 병합해서 작용하므로 장기적인 수명에도 악영향을 끼치게 된다. 표 2 단락전류의 편차가 클수록 단락전류와 출력의 감소율이 증가함을 알 수 있다.

표 2. 실험 전후의 전기적인 특성 감소율

	Isc 감소율	Pmax 감소율
0%	3.992%	4.282%
1%	4.128%	5.293%
3%	4.717%	6.657%
Random	4.638%	5.598%

## 6. 결 론

태양전지모듈은 낮은 전압(약 0.6V) 특성 때문에 수십 장을 직렬 연결한다. 이때 발생하는 문제점이 전류 값의 편차이다. 태양전지모듈의 전류 값은, 수십 장 연결된 태양전지 중 가장 낮은 전류 값을 갖는 태양전지에 의해 결정된다. 그로 인해 낮은 전류 값을 갖는 태양전지는 열점현상이 발생하게 되고 장기적인 수명은 짧아지게 된다. 그러므로 태양전지모듈 제작 시 태양전지를 선택함에 있어서 전기적인 출력 특성을 고려해야 한다.

## 참 고 문 헌

1. S. T. Kim, C. H. Park, G. H. Kang, Waithiru C. K. Lawrence, H. K. Ahn, G. J. Yu, D. Y. Han, Operation Characteristics of Bypass Diode for PV Module, J. of KIEEME, Vol. 21, No. 1, p. 12, 2007. 1.
2. 이재형 외, 태양전지 원론, 홍릉과학출판사, 2005.
3. <http://www.energy.or.kr>, 에너지관리공단 신재생에너지센터
4. A. Abete, F. Cane, C. Rizzitano, M. Tarantino, R. Tommasini, Performance testing procedures for photovoltaic modules in mismatching conditions, in: Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1991.
5. A.M. Ricaud, Solar cells failure modes and improvement of reverse characteristics, in: Proceedings of the Fourth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, 1982.