PV모듈에서 그림자에 의한 전기적 특성

김승태*, 강기환**, 박지홍*, 안형근*, 유권종**, 한득영*

*건국대학교 대학원 전기공학과(hkahn@konkuk.ac.kr)
**한국에너지기술연구원 태양광발전센터(ghkang@kier.re.kr)

The Electrical Characteristics of Shading Effect in Photovoltaic Module

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 electric characteristics of shading effects in photovoltaic module in case of outdoor operation. When fabricating PV module, solar cells are connected serially to obtain the high voltage because of its low open circuit voltage. And total current is determined by lowest current among solar cells. When the shading happens on PV module's surface, the current of shaded solar cell determine the total current flow. Because of this, generally by-pass diode is installed on junction box. The bypass diode operate when revered and shaded solar cell's voltage is over 0.6 voltage. The reverse-biased solar cell gives reduced maximum power of PV module and might give negative effect on durability. So, adequate by-pass installation and selection is needed.

Keywords : 태양전지모듈(Phtovoltaic module), 그림자(Shading), 바이패스다이오드(Bypass diode), 핫스팟(hot-sot), 최대출력(Pmax, Maxium power), 단락전류(Isc, Short circuit current)

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

현재 환경문제 및 국제유가 100달러 돌파라는 상황에서 신재생에너지의 연구개발·보급이 시급하다. 신재생에너지 중 태양광발전시스템은 청정하고 재생가능하며 무한대에 가까운 가용량을 가지고 있는 에너지원이다. 태양광발전시스템은 세계적으로 설치 비율이 증가하고 있으며, 수명이 20년 이상이고 유지보수비용이 적은 이점이 있다. 이러한 태양광발전시스템의 수명을 결정짓는 요인 중 태양전지모듈이 중심에 있다. 여러 종류의 태양전지모듈이 존재하지만 신뢰성을 확보한 결정질 실리콘 태양전지의 비중이 약 90% 이다.[1] 20년 이상을 이상 없이 사용하려면 태양전지모듈의 제조공정이 중요하지만, 설치 후 사용하는 과정도 매우 중요하다.

본 논문에서는 설치 후 발생하는 여러 종류의 한 현상이며, 가장 빈번하게 일어날 수 있는 그림자에 의한 전기적 특성에 관해 연구하였다. 실험을 위해 바이패스 다이오드 설치·미설치에 따라 제작하여 진행 하였다.

2. 태양전지모듈의 전류

태양전지의 등가회로가 그림 1에 나타나 있으며, 전압·전류식은 식 1에 나타나 있다.

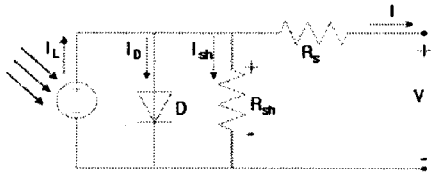

그림 1. 태양전지 등가회로

$$I = I_L - I_0\left(\exp\left(\frac{q\times(V+I\times Rs)}{n\times k\times T}\right)-1\right) - \frac{V+I\times Rs}{Rsh} \quad (1)$$

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

여기서 I_{sc}는 short circuit current 이므로 식 1에서 전압 V가 0일 때 이다. V=0으로 놓고 정리하면 다음과 같이 식 2가 된다.

$$I_{SC} \cong I_L \ (\because R_s = 0, R_{sh} = \infty) \quad (2)$$

식 2는 이상적인 경우의 I_{sc}이다. 하지만 실제 태양전지는 $R_s \neq 0$, $R_{sh} \neq \infty$이다. 그림 1에서 R_{sh}값이 작으면 누설전류가 발생하여 I_{sc}는 작아지게 된다. 또한, 전체 전류를 결정짓는 I_L은 태양전지의 면적 및 태양의 일사강도에 의존한다.

3. 태양전지모듈의 I-V 그래프

태양전지는 낮은 전압 특성을 갖기 때문에 필요한 용량을 얻기 위해 직렬로 연결하여 구성한다. 직렬연결 하기 때문에 높은 전압을 얻을 수는 있지만 전류는 일정하게 된다. 즉, 전류 값이 모두 다르다면 가장 낮은 전류 특성을 갖는 태양전지의 전류 값에 의해 결정 되고, 결과적으로 출력도 낮아지게 된다. 합성 전류를 구하는 원리는 그림 2와 같다. 이렇게 전류가 미스매치 되는 경우는 첫째, 각각 태양전지의 전류 특성이 다를 때와 둘째, 태양전지모듈로 구성하여 실제 외부 설치 시 그림자 또는 파손 등에 의해 발생한다. 이와 같은 현상에 의한 피해를 최소로 하기 위해 바이패스 다이오드를 설치하는 것이다.

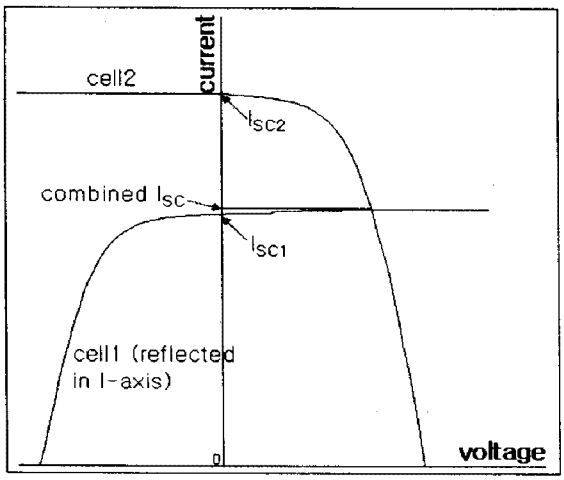

그림 2. 직렬연결 된 낮은 전류 특성 태양전지의 합성 전류 계산

또한, 그림 2와 같은 경우에 바이패스 다이오드의 설치 및 동작에 따른 I-V 그래프는 그림 3과 같다. 바이패스 다이오드로 전류가 흐를 땐, 출력의 감소도 발생한다.[2)]

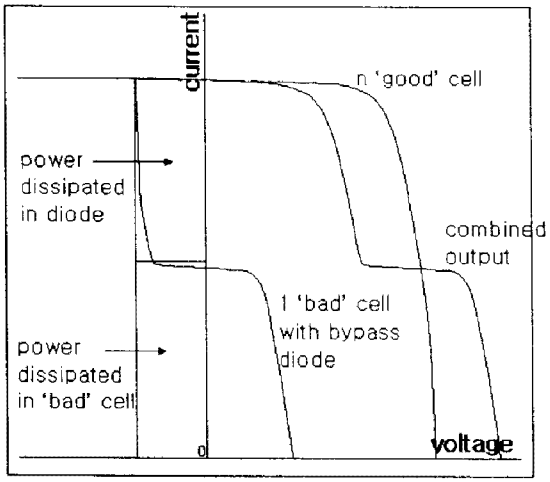

그림 3. 태양전지모듈에서 바이패스 다이오드 동작에 따른 출력 계산

4. 실험방법 및 실험장치

실험을 위해 태양전지 24장을 직렬로 연결한 태양전지모듈을 바이패스 다이오드 설치·미설치에 따라 2장 제작하였다. 각 모듈의 parameter는 표 1에 있으며, 모든 실험은 STC (AM 1.5 1kW/m^2 25℃)조건에서 실험했다. 그림 4와 같이 24장의 태양전지를 8장씩 총 3개 군으로 나누어 바이패스 다이오드를 설치하였으며, 그 중 1번 군의 태양전지 한 장에 그림자의 비율을 태양전지 면적 당 5%씩 증가시켜 100%가 될 때까지 I-V 그래프를 측정했다. 바이패스 다이오드가 없는 모듈도 같은 방법으로 측정했다.

위와 같은 측정을 위해 인공광원을 이용한 Belval사의 PasanⅢb Sun Simulator를 사용하였다.

표 1. 태양전지모듈 parameter

a. 바이패스 다이오드 설치

Irrad.[W/m2]	T[℃]	Isc[A]	Voc[V]	Pmax[W]	FF[%]
1000	25	5.16	14.2	53.3	72.7

b. 바이패스 다이오드 미설치

Irrad.[W/m2]	T[℃]	Isc[A]	Voc[V]	Pmax[W]	FF[%]
1000	25	5.11	14.3	53.8	73.6

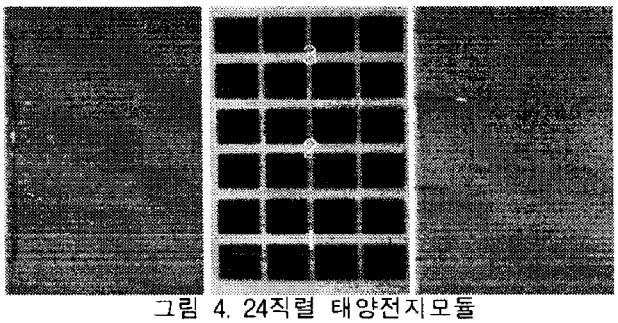

그림 4. 24직렬 태양전지모듈

5. 결과 및 고찰

STC조건에서 Sun Simulator를 사용하여 그림 4의 모듈을 각각의 군별로 측정한 I-V 그래프가 그림 5에 나타나 있다. 각각의 I_{sc}는 모두 5.16A로 같으나, V_{oc}는 14.2V, 9.4V, 4.7V로 측정됐다. 1번 군의 태양전지 한 장에 그림자를 주어 바이패스 다이오드가 설치된 모듈을 측정했다. 이상적인 경우라면 1번 군이 바이패스 되어 P_{max}는 그림 5의 1,2 또는 2,3 scope 같은 값이 측정 될 것이다.

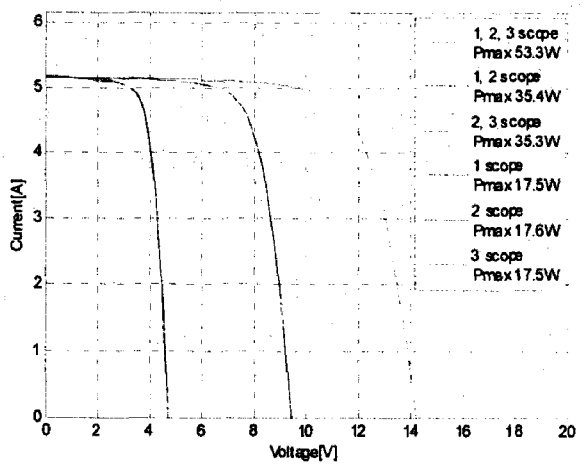

그림 5. 각 군별 I-V 그래프

그림자의 비율을 5%씩 증가시켜 측정한 I-V 그래프가 그림 6에 나타나 있다. 이 그래프에서 그림자의 비율이 55%까지 I_{sc}와 P_{max}가 계속 감소함을 알 수 있다. 그리고 60%부터 일정한 값을 유지한다. 즉, 그림자의 비율이 한 개의 셀 면적당 60% 이상이 되면 바이패스 다이오드가 동작함을 알 수 있다. 하지만 앞에서 예상한 것과는 다르게 P_{max}가 감소한 것은 그림 3에서와 같이 그림자가 생긴 군의 바이패스 다이오드로 전류가 흐르면서 손실이 발생했음을 알 수 있다.

바이패스 다이오드가 있는 모듈을 통해 그림자의 비율에 따른 동작시점을 알아보았다.

위 실험과 비교를 하기 위해 바이패스 다이오드가 없는 모듈을 위와 동일한 조건으로 진행하였고, 그림 7에 나타나 있다. 그 결과 그림 6과 같이 그림자 비율이 55%까지 비슷한 추세를 보였지만, 그 이후 60%부터는 계속 감소한 것을 알 수 있다.[3)]

바이패스 다이오드의 설치·미설치에 따라 바이패스 다이오드가 동작하기 전·후를 비교하여 정리하여 표 2에 나타냈다.

표 3은 그림 6과 그림 7의 실험에서 얻어진 태양전지모듈의 parameter를 정리한 것이다. I_{sc}의 감소는 그림자에 의해 태양전지가 받는 인공광원의 일사강도의 양이 계속 줄어들면서 발생하는 것이고, 그에 따라 최대 동작 전류인 I_{mp}도 감소한다.

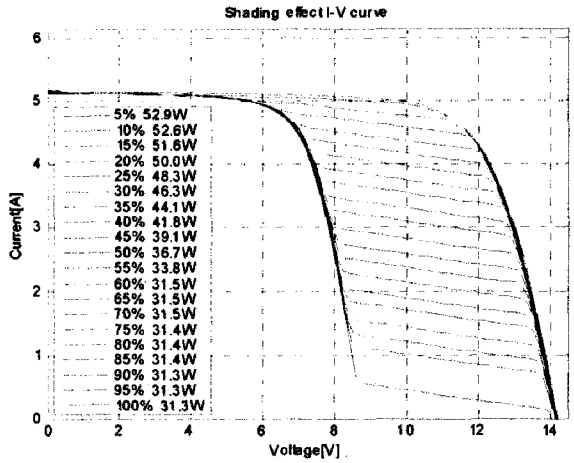

그림 6. 바이패스 다이오드 설치 모듈의 그림자 비율(%)에 따른 I-V 커브

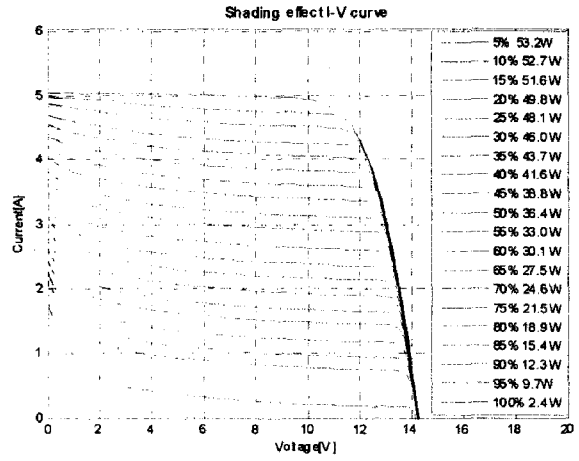

그림 7. 바이패스 다이오드 미설치 모듈의 그림자 비율(%)에 따른 I-V 커브

표 2. 바이패스 다이오드 동작 전·후

	바이패스 다이오드 설치		바이패스 다이오드 미설치	
	동작 전 (~55%)	동작 후 (60%~)	동작 전 (~55%)	동작 후 (60%~)
I_{sc}	초기값일정	초기값일정	감소	감소
V_{oc}	초기값일정	감소	초기값일정	초기값일정
I_{mp}	감소	초기값일정	감소	감소
V_{mp}	초기값일정	감소	초기값일정	초기값일정

또한, R_{sh}도 감소를 하는데 이는 실제 태양전지모듈의 R_{sh}의 감소가 아닌 I_{mp}의 감소 비율에 따라 감소한 것이다.

표 3. 그림자 비율에 따른 태양전지모듈 parameter

a. 바이패스 다이오드 설치

그림자 비율(%)	Voc	Vmp	Rs	Isc	Imp	Rsh
0	14.2	11.3	0.4	5.12	4.69	182.73
5	14.2	11.3	0.4	5.14	4.65	118.47
10	14.2	11.5	0.3	5.15	4.59	56.42
15	14.2	11.6	0.4	5.16	4.44	46.8
20	14.2	12	0.3	5.16	4.18	42.26
25	14.2	12.1	0.3	5.16	3.98	41.62
30	14.2	12.3	0.3	5.17	3.77	36.42
35	14.2	12.5	0.3	5.17	3.54	35.41
40	14.2	12.6	0.3	5.18	3.31	30.92
45	14.2	12.6	0.3	5.18	3.1	30.18
50	14.2	12.8	0.3	5.18	2.87	30.51
55	14.2	12.9	0.3	5.18	2.59	30.08
60	14.2	6.8	0.4	5.14	4.61	115.79
65	14.2	6.8	0.4	5.14	4.61	134.87
70	14.2	6.8	0.4	5.14	4.6	118.28
75	14.2	6.8	0.4	5.14	4.59	132.62
80	14.4	6.7	1.1	5.14	4.72	126.54
85	15.2	6.8	3	5.14	4.58	121.54
90	15.5	6.8	4	5.14	4.58	129.93
95	15.3	6.8	4.6	5.14	4.58	143.45
100	12.7	6.8	3.7	5.14	4.57	131.48

b. 바이패스 다이오드 미설치

그림자 비율(%)	Voc	Vmp	Rs	Isc	Imp	Rsh
0	14.3	11.3	0.4	5.03	4.69	264.54
5	14.3	11.3	0.4	5.05	4.7	173.74
10	14.3	11.5	0.4	5	4.59	28.83
15	14.3	11.6	0.4	4.86	4.43	20.2
20	14.3	12	0.4	4.65	4.15	17.32
25	14.3	12.1	0.4	4.47	3.96	16.48
30	14.3	12.3	0.4	4.28	3.73	15.19
35	14.3	12.5	0.4	4.07	3.5	14.51
40	14.3	12.5	0.4	3.89	3.34	13.63
45	14.2	12.6	0.3	3.66	3.08	12.56
50	14.2	12.8	0.3	3.47	2.85	12.1
55	14.2	12.9	0.4	3.21	2.55	11.42
60	14.2	12.9	0.4	2.96	2.34	11.31
65	14.2	13.1	0.3	2.77	2.11	10.73
70	14.2	13.2	0.3	2.56	1.86	10.35
75	14.2	13.2	0.3	2.35	1.63	9.6
80	14.2	13.2	0.3	2.18	1.44	9.04
85	14.2	13.3	0.4	1.93	1.15	8.56
90	14.2	13.5	0.4	1.74	0.91	7.96
95	14.2	13.3	0.4	1.58	0.73	7.55
100	14.1	13.4	0.7	1.13	0.18	6.37

그림 8은 태양전지모듈의 전류 흐름을 나타낸 것이다. 바이패스 다이오드가 설치 된 경우 동작 원리는 태양전지에 그림자가 발생했을 경우 다른 태양전지와 달리 I_{sc}의 감소로 인해 역 바이어스가 인가되어 결과적으로 수동소자로 동작을 하게 된다. 이때 V_r(역 바이어스 전압)의 값이 식 3과 같다.

$$V_r \geq V_{bd}(\simeq 0.6V) \qquad (3)$$

식 3의 조건을 만족 하면 바이패스 다이오드가 동작하게 된다. 이로써 그림자가 발생한 군의 태양전지는 사용하지 않고, V_{mp}는 나머지 군의 전압에 의해 결정된다. 태양전지모듈이 정상동작 하기 때문에 I_{sc}도 정상적인 값이 나오게 된다.[4)]

그러나 바이패스 다이오드가 미설치 된 경우 태양전지에 그림자가 발생했을 경우 그림자의 비율이 증가 할수록 역 바이어스의 크기도 증가한다. 이때 태양전지모듈의 I_{sc}는 그림자가 발생한 태양전지의 I_{sc} 만큼 발생하고, V_{mp}는 전체 태양전지의 전압에 의해 결정된다.

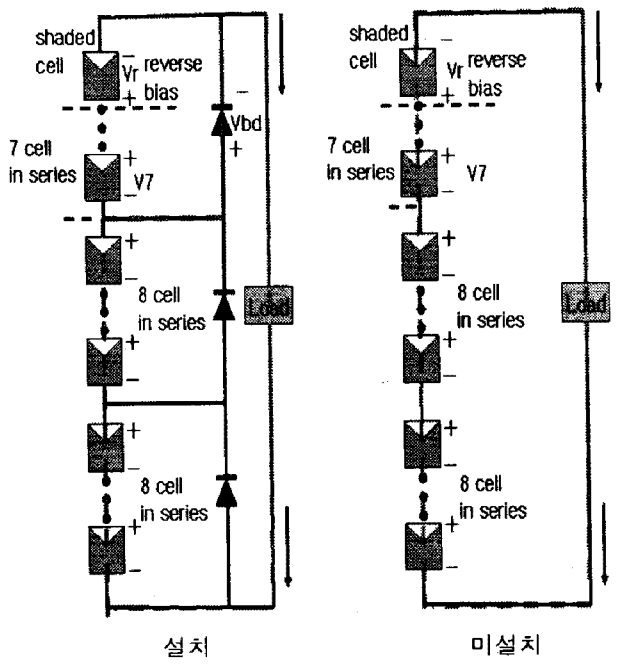

그림 8. 태양전지모듈의 전류 흐름

바이패스 다이오드가 동작하지 않을 때와 바이패스 다이오드가 없는 모듈의 경우, 역방향바이어스 때문에 태양전지가 능동소자가 아닌 수동소자로 동작할 경우 핫스팟(hot-spot)이 발생하여 태양전지모듈의 수명을 단축시키는 요소가 된다.[5)]

6. 결 론

태양전지모듈은 낮은 전압 특성 갖는 태양전지 때문에 필요한 용량을 얻기 위해 직렬연결하여 사용한다. 이때 합성전류는 각 태양전지의 전류 중에서 낮은 전류를 따라서 결정되는데 태양전지모듈에 그림자가 발생한다면, 그림자가 발생한 태양전지의 전류에 따라 전체 전류가 결정된다. 이와 같은 원인으로 인한 출력 감소를 방지하기 위해 바이패스 다이오드를 설치한다. 바이패스 다이오드의 동작 시점은 그림자에 의해 역 바이어스 된 태양전지의 전압이 약 0.6V 이상일 때이다. 역 바이어스 된 태양전지에 의한 출력 감소와 핫스팟 방지를 위해 적절한 바이패스 다이오드의 배치와 설치가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김동환, 국내외 태양광분야 기술개발 및 시장현황, 한국태양에너지학회지, 4권 3호, 2005. 8.
2. Wenham, Stuart R., Green, Martin A. and Watt, Muriel, Applied Photovoltaics, Earthscan, pp. 75-83, 2007
3. 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.
4. Henk Oldenkamp, Detailed analysis of currents in PV-shunts, 2002. 2.
5. M.C.Alonso-Garica, J.M. Ruiz and F. Chenlo, Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 90, Issue 3, p. 329-340, 2006. 2.