

태양광 어레이 모델링을 통한 최대출력점 고찰

저자 : 유권중, 송진수 / 노명근*, 성세진 // 김시경

소속 : 한국에너지기술연구소 / 충남대학교 // 공주대학교

Abstract: A model of a photovoltaic array written in PSPICE is presented in this paper. PSPICE is used to display array characteristics(I-V, P-V curve) as a function of parameters such as insulation and temperature. This paper is display in detail through a example of SM-50 model.

1. 서론

그린에너지인 태양광을 효율적으로 이용하기 위해서는 변환효율을 높이는 것이 가장 필요한 일이다. 여기에서는 PSPICE를 통하여 셀라셀과 모듈을 구성하고 시뮬레이션을 통하여 셀라셀의 I-V특성과 최대출력점을 도출하여 변환효율을 높이는 방법을 고찰하고자 한다. 하지만 일사량과 온도 등의 외부 영향에 의해서 최대출력제어를 통한 안정적인 전력을 공급하기 어렵다. 여기에서는 PSPICE를 통하여 구성한 셀라셀과 모듈, 어레이를 가지고 셀과 모듈, 어레이의 I-V특성과 최대출력점의 변화를 고찰해서 최대출력제어에 적용하고자 한다.

2. pn 접합 다이오드

실리콘등의 반도체의 pn접합에 빛을 비추면 광기전력 효과에 의해 n형(전자多)으로부터 p형(정공多)의 방향으로 광기전류 I_{ph} 가 흐른다. 전극간에 전압을 p형의 전극을 양으로 하고 n형의 전극을 음으로 하면 이때 식(1-1)의 전류 I_d 가 광기전류 I_{ph} 와는 반대방향으로 흐른다.

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad \text{-----(1-1)}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad \text{-----(1-2)}$$

따라서 식(1-2)은 태양전지의 I-V특성을 나타내는 식이 된다.

3. 태양전지 등가회로

보통의 태양전지 어레이는 모듈을 단위로 한 집속 구성이므로 실제 규모의 태양전지 어레이를 시뮬레이션하기 위해서는 이들의 등가회로를 구성해

야 한다. 태양전지의 한 소자당의 등가회로는 주지와 같이 그림1에 근사적으로 표현할 수 있고, 전압, 전류 관계식으로 나타낸다.

입사광량에 비례한 광기전류 I_{ph} , 다이오드전류 I_d , 누설전류 I_{sh} 가 존재한다. 이 결과, 출력전류는

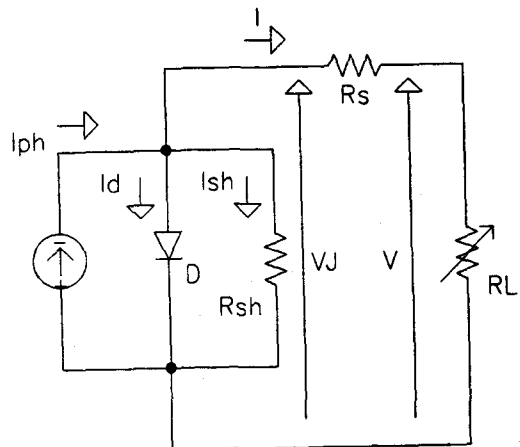
$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{-----(1-3)}$$

로 나타낸다. 그리고 I_d 은 다음과 같이 나타낸다.

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad \text{-----(1-4)}$$

여기에 I 는 역방향 포화전류, n 은 다이오드 성능지수, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, q 는 전하, V_j 는 접합전압으로하고, I_0 와 n 은 태양전지의 종류에 의해 결정된다. 누설전류 I_{sh} 는 동작전압에 비례하기 때문에, 다음과 같이 나타낸다.

$$I_{sh} = \frac{V_j}{r_{sh}} \quad \text{-----(1-5)}$$



(그림1. 셀라셀의 등가회로)

직렬저항 r_s 는 태양전지 반도체의 전기저항인데, 출력전류가 커지게 되는 것과 함께 전압강하가 생기게 된다. 출력전압의 식을 다음과 같이 나타내었다.

$$V = V_J - I r_s \quad \text{-----(1-6)}$$

식(1-3)에 식(1-4)~(1-6)을 대입하면,

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + I r_s)}{nkT} \right\} - 1 \right]$$

$$\frac{(V + I r_s)}{r_{sh}} \quad \text{-----(1-7)}$$

으로 되고, 식(1-7)이 태양전지의 일반적인 특성 식이다. 솔라셀은 비선형이기 때문에 그 특성은 그림2에 보이는 일사량에 따른 단락전류의 I-V 특성 곡선으로 나타낼 수 있다. 또한 어떤 동작점에 대한 출력 전력은 그림3에 보인 정사각형 영역과 같다. 지시한 점은 출력전력의 최대점이다.(Pmax)

솔라셀의 동작온도는 다양한데, 개방회로 전압과 단락회로 전류는 솔라셀의 온도변화 영향을 이해하는데 필요하다. 온도가 증가함으로써 개방회로 전압은 그림4와 같이 감소하는 경향이 있다. 개방회로 전압과 단락회로 전류의 관계방정식은 다음과 같다.

$$I_{sc} = I_0 \left[\text{EXP} \left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right) \right] \quad \text{-----(1-8)}$$

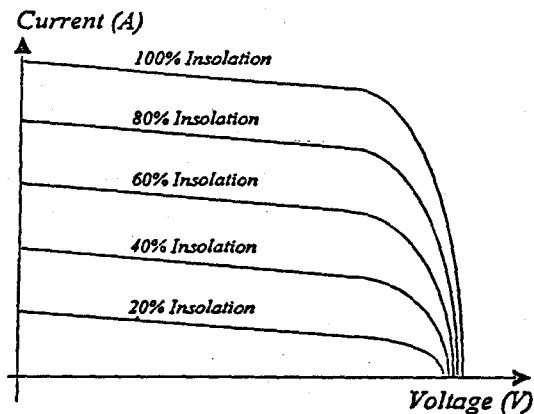


그림2. 일사량에 따른 I-V곡선

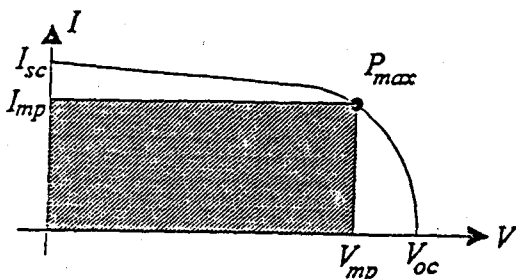


그림3. 최대출력점

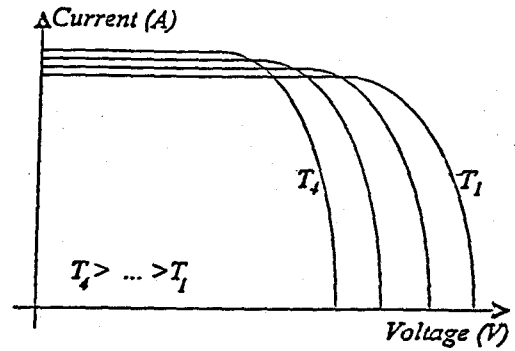


그림4. 온도에 따른 솔라셀의 I-V곡선

그 출력전력은 Voc의 감소에 따라 감소한다. 따라서 솔라셀의 효율은 온도가 증가할수록 감소한다. 실리콘에 대해서 출력 Power는 매 °C마다 0.4%~0.5%가 감소한다.

4. 솔라모듈의 모델링

솔라모듈의 모델링을 하는데 있어서 솔라셀은 수십개를 직렬로 연결하기 때문에 이에 대한 광기전류치, 전압특성, 직렬저항, 병렬저항등을 계산에 의하여 솔라셀 등가회로에 대입해서 솔라모듈을 모델링할 수 있다.

단락조건하에서 $I = I_{sh}$, $V = 0$, $r_s = I_{sh}$ 이고, 식(1-7)은

$$\ln \left\{ \frac{(I_{ph} - I_{sc})}{I_0} \right\} = \frac{q I_{sc} r_s}{nkT} \quad \text{-----(1-9)}$$

$\ln[(I_{ph} - I_{sc})/I_0]$ 대 I_{sc} 는 $q r_s / nkT$ 로 주어진 기울기를 가지고 있다. 여기에서 직렬저항 r_s 가 구해진다.

병렬저항 r_{sh} 는 다음과 같은 식에서 구해진다. 식(1-7)을 개방전압 V_{oc} 와 I_{sc} 의 항목으로 다시쓰면,

$$\begin{aligned} I_{sc} \left(1 + \frac{r_s}{r_{sh}} \right) - \frac{V_{oc}}{r_{sh}} &= I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{nkT} \right) - 1 \right] \\ &= \frac{V_{oc}}{r_{sh}} \quad \text{-----(1-10)} \end{aligned}$$

이 방정식은 복잡하지만 $r_s \ll r_{sh}$ 로 간소화시킬 수 있다. 만약 크기가 아주 작은 빛의 강도하에서 만들어지면

$$I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{nkT} \right) - 1 \right] = \frac{V_{oc}}{r_{sh}} \quad \text{----(1-11)}$$

$$I_{sc} = \frac{V_{oc}}{r_{sh}}$$

이것으로 병렬저항을 구할 수 있게 된다.

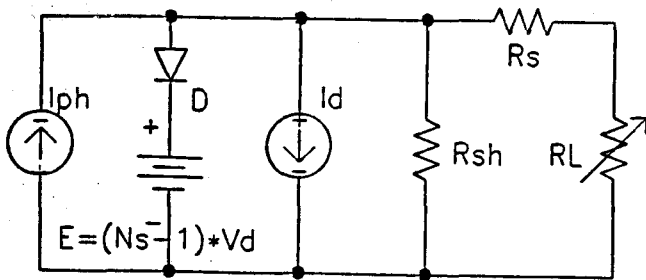
위에서 구한 것은 셀 하나에 저항치이기 때문에 모듈에 관한 저항은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{모듈의 직렬저항 } R_S = \left(\frac{n}{m}\right)r_S \quad \text{---(1-12)}$$

$$\text{모듈의 병렬저항 } R_{Sh} = \left(\frac{n}{m}\right)r_{Sh} \quad \text{---(1-13)}$$

n 은 직렬 셀의 수이고, m 은 병렬 셀의 수이다.

그림5는 태양광 어레이의 동작특성을 설명하기 위해 사용하는 PSPICE모델을 나타낸 것이다. 여기에서는 온도보정의 관계도 고려하였다.



(그림5. PV 어레이의 모델)

어레이의 I-V특성을 결정하는데 2개의 방정식을 사용한다.

$$I_{ph} = \{I_{sc} S_N + I_L (T_c - T_r)\} N_p \quad \text{---(1-14)}$$

$$I_D = \left[I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_L}{AkTN_S}\right) - 1 \right) \right] N_p \quad \text{---(1-15)}$$

여기서 I_{ph} ; 광기전류(A), S_N ; 표준솔라저항(기본적으로 $1000W/m^2$), I_L ; 단락회로 전류온도계수($A/^{\circ}K$), I_D ; 다이오드 전류(A), I_0 ; 역포화전류(A), A&B; manufacturer 상수, T_r ; 셀 reference 온도, N_p ; 병렬 셀의 수(m), N_s ; 직렬셀의 수(n) 이다.

5. PSPICE 결과

일반적으로 I-V특성을 PSPICE로 시뮬레이션하는 방법에는 부하단에 있는 가변저항을 가변시키면서 그에 따른 전압과 전류의 변화를 측정할 수 있는

방법과 PSPICE의 기능 중에서 DC Sweep을 사용하여 부하단에 인가한 DC전압을 가변시켜서 그에 따른 전류의 변화를 측정할 수 있는 방법이 있는데, 여기에서는 DC Sweep를 사용하여 시뮬레이션하였다.

다음 그림6은 일사량이 $1000, 600, 200W/m^2$ 일때, 삼성모델(SM-50)의 I-V, P-V특성을 나타낸 것이다. 최대전력은 일사량과 온도에 의해 저하됨을 볼 수 있다.

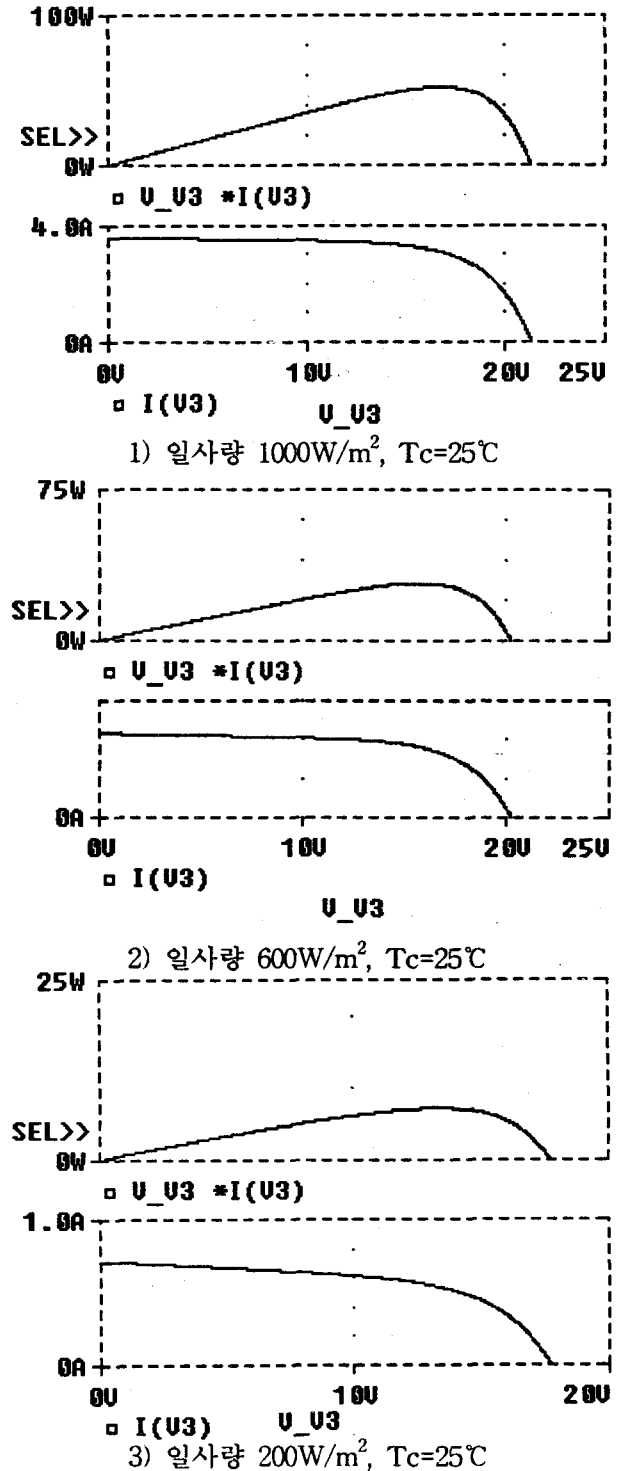


그림6. SM-50의 일사량에 따른 I-V, P-V곡선

또한 그림7은 한국에너지기술연구소 옥상에 설치된 삼성모델(SM-50)의 3KW 용량의 어레이를 PSPICE를 통하여 모델링하여 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다. 여기에서는 직렬로 모듈을 14개를 구성하고, 병렬로 4개를 구성하였다. 그러므로 태양광 어레이의 주요한 값은 다음과 같다. $I_{ph} \cdot N_p = 14.48A$ 이고, $E = (N_s - 1) \cdot V_d = 290.18V$ 이고, 직렬저항은 2.64 Ω 이고, 병렬저항은 374.15 Ω 이다.

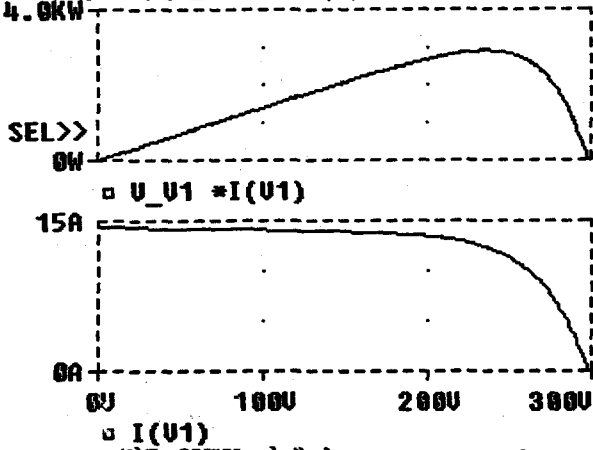


그림7. 3KW 어레이 I-V, P-V 곡선

6. 최대전력점 제어

PV어레이의 내부저항은 태양광 일사량으로써 변화되고, 이에 따라 I-V 또는 P-V곡선은 광범위한 범위로 결정된다. 따라서 부하를 PV어레이에 직접 연결한 경우에는 부하는 I-V곡선의 넓은 범위에서 동작한다. 그렇지만 최대출력은 곡선상의 한점을 나타내고, 이 점에서 부하효율이 최대이다. MPPT삽입은 태양광 일사량과 셀동작온도의 변화와 같은 모든 조건하에서도 최대전력점에서 부하가 동작하도록 할 것이다. 그림8에 나타난 MPPT의 기본동작은 동작전압 V_{PV} 를 센싱하고, 최대전력을 얻을 수 있는 전압을 대표하는 기준전압 V_{ref} 와 V_{PV} 를 비교하여 발생한 펄스신호를 스위칭 장치에 공급하게 된다. 이것은 입력DC전압을 모든부하에서 V_{mp} (최대전력 전압)에 맞추게 된다.

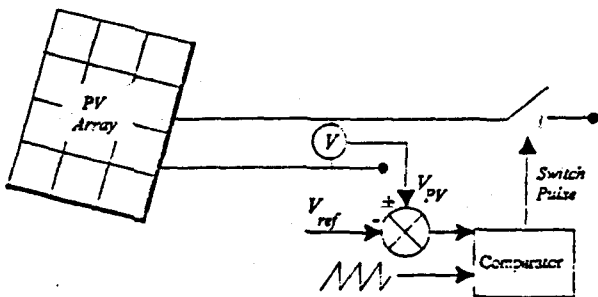


그림8 MPPT 블럭 다이어그램

7. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 PSPICE를 사용한 태양광 어레이 시뮬레이션이 일사량과 온도에 따른 특성을 고찰하는데 유효함을 알 수 있었다. 이후로는 그림자의 영향에 따른 어레이의 I-V, P-V특성을 알아보고, 또한 보다 구체적으로 승강압초퍼를 연결한 최대전력점 제어를 통하여 태양광 발전의 변환효율을 높이고자 한다.

참고 문헌

- 1) Kuniho Tanaka, Etsuo Sakoguchi; [Simulated Power Source Based on Dynamic Characteristics of Solar Cell], 平成4年 일본전기학회 산업응용부문 전국대회 논문집 NO77.
- 2) M.A. Green; [Solar Cell: Operating Principles, Technology, and System Applications], 1982.
- 3) R. Katan, V. Agelidis and C. Nayar; [PSPICE Simulation of Potovoltaic Arrays], International Journal Electrical Engineering Education, October 1995.
- 4) 유권중외; [전력 Peak Cut를 위한 주택용 태양광 발전 시스템의 에어컨 개발(III)], 전력연구원, 1995. 9
- 5) 최평, 조용범, 목형수, 백동철, 금융조; [PSPICE 기초와 활용], 복두출판사.
- 6) Muhammad H. Rashid; [SPICE for Circuits and Electronics Using PSpice], Prentice-Hall international, Inc
- 7) H. S. Rauschenbach; [Solar Cell Array Design Handbook], p.52-p74, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY.