

태양광발전용 cell의 시뮬레이션에 관한 연구

*이강연, **이정일, **김병인, **정성교, **박용섭, **서장수
*조선대학교 전기공학과, **송원대학

A Study on The Simulation of Photovoltaic Cell

*K. Y. Lee, ** J. I. Lee **B. I. Kim, ** S. K. Jeung, ** Y. S. Park, ** J. S. Suh.
* Dept. of Electric Eng. Chosun Univ. ** Songwon college

Abstract - PV model is presented based on the shockley diode equation. The simple model has a photo-current source, an single diode junction and a series resistance and includes temperature dependences. An accurate PV module electrical model is presented, matching with boost converter MPPT strategy and demostnstrated in Matlab for a typical general purpose solar cell. Given solar insolation and temperature, the model returns current vector and MPP.

1. 서 론

태양광 발전 시스템의 연구는 Array라 불리는 물리학 분야와 이를 최적의 상태로 부하와 연동시키기 위한 연구를 행하는 전력변환시스템 분야로 나눌 수 있으며, 태양광발전시스템의 발전은 태양광 Cell의 출력특성과 전력전자의 입력특성이 조화를 이루어 최대효율을 만들어야만 한다^[1]. 태양전지의 발전전력은 일사량, Cell의 온도 및 동작온도 등에 의존하고, 에너지 변환효율은 십수% 정도로 매우 작은 편이다. 따라서 가능한 한 태양전지로부터 많은 에너지를 확보하도록 전체효율을 개선해야만 한다^[2].

태양전지의 출력특성은 일사량 변화에 따른 태양전지의 최적동작점인 출력전력의 P_{max} 점을 각각 가지고 있는데 이 P_{max} 점이 각 일사량 값에서 태양전지 에너지효율이 가장 높은 점이라 할 수 있다. 이러한 최대전력 발생 동작점은 일사량이나 주위온도에 따라 변하고 태양전지 제조업체마다 다르게 나타나며 동일한 제조업체의 경우에도 각각 다르게 나타날 수 있으므로 항상 최대출력점에서 동작할 수 있도록 태양전지의 동작점을 제어하는 것이 필요하다^[2]. 이러한 MPPT 제어방법에는 간접법과 직접법으로 두 가지로 나눌 수 있는데 간접법은 태양전지의 최적동작전압은 일사량변화에 대하여 크게 변하지 않으므로 주기적으로 기상조건이나 부하상태에 대한 개방전압을 측정하여 획득한 데이터를 참조하여 최대 출력점에서 동작하도록 제어하는 방법이다. 그러나 이 방식은 태양전지의 오손이나 경년변화에 대하여 태양전지의 특성변화로 인하여 시스템효율이 감소할 수 있다. 직접법은 직접 태양전지의 출력을 계측하여 동작점의 변화에 대한 전력의 변화율이 0이 되도록 제어하는 방법이다. 그러므로 태양전지의 오손이나 경년변화에 대한 태양전지의 특성이 변해도 항상 최대출력점에서 동작할 수 있다. 그러나 상태량의 계측이 번거롭고 제어회로가 복잡하게 된다^[3].

본 연구에서는 Matlab을 이용하여 태양광발전 셀에 대해 모델링하고 이 모델을 일사량과 온도레벨에 따른 최대전력점의 변동의 조사에 이용하였다. 또한 Boost 컨버터 토폴로지와 최대 전력점 추적방식이 비교되어 일정전압 부하에 직접 연결되어 그 특성을 연구하였다.

2. 최대전력점 추적방법

현재 태양광발전 최대출력점 제어방법에는 몇몇의 방식들이 연구되고 있다.^[4] 첫째, 제한제어에 따른 MPPT 제어 방법으로 이 방식은 태양전지 어레이의 단자전압을 시스템의 제어변수로 사용하며, 어레이 단자전압을 제어하고자 하는 전압에 일치되도록 만든다. 따라서, 제어가 간단하고 구현이 쉽지만 태양전지 어레이의 일사량이나 온도에 의한 효과가 무시되어지고 배터리 충·방전장치를 포함한 시스템에 폭넓게 사용되어질 수 없는 단점이 있다. 두 번째로 일정전압 제어 방식 MPPT제어 알고리즘에 의한 방법은 태양전지 어레이의 출력전압은 일사량의 변화에 대해서 약간의 변동폭을 가지는 정전압 특성을 나타내고 있으므로, 어떤 일정한 전압을 설정하여 정전압으로 제어하는 방법을 일정전압 제어방법이라고 하여, 이 기법은 출력에 대해 전력량이 필요하지 않다. 부스트 컨버터의 태양전지 출력측 DC전압은 정상상태 조건의 V_{ert} 값에 의해 일정하게 유지된다. 이 일정전압 제어방식은 전류센서를 줄일 수 있으나 일사량 급변시 정확한 MPP를 찾아 동작하지 못해 출력효율이 감소하는 단점이 있다. 네 번째로 P&O MPPT알고리즘을 이용한 제어방법은 간단한 피드백 구조를 갖으며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용되고 있다. 이것은 태양전지전압을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 동작하며, 이 전의 교란주기동안의 태양전지 어레이 출력전력과 함께 현재 어레이 출력전력 비교에 의해 최대전력의 상태를 연속적으로 추적하며 찾는 방식이다. 다섯 번째로 IncCond(Incremental Conductance) MPPT 알고리즘은 부하 임피던스와 태양전지 임피던스와의 비교에 의해서 태양전지 출력을 제어하는 방법이며, P&O 알고리즘의 결점은 MPP점에서 자력진동하는 것이며, 일사량 변동에 따라 전압 변동폭(step)이 따라 가지 못하는 것이다.

3. Solar Cell 모델링

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있다. 현실상 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 집적저항 및 표면층의 시트(sheet)저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다. 태양전지 표면에 입사하는

빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수함수적으로 감소한다. 그림1은 빛이 조사될 때 광기전력효과(Photovoltaic Effect)를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다.

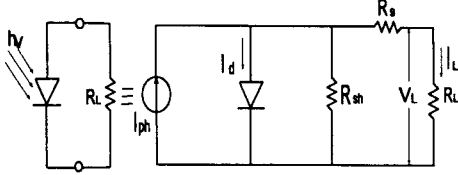


Fig. 1 태양전지 등가회로

기본적으로 전류전원의 출력은 Solar Cell에 빛이 도달한 만큼 비례한다. 따라서 다이오드는 셀의 I-V 특성을 결정한다. 여기서 I_{ph} 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(Carrier)가 외부로부터 방해받지 않을 때 폐회로를 통해 흐르는 광전류이고, I_d 는 암전류로서 I_{ph} 와는 반대 방향이다. 병렬저항 R_{sh} 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s 와 R_L 은 각각 전지 내부에 존재하는 직렬저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타내고, 분로저항은 포함되지 않았다. I_o 는 온도에 따른 다이오드 포화전류이고, I_L 은 온도의 변화에 따른 광전류를 나타내고, 다이오드의 quality factor는 n 은 1에서부터 2까지 사이로 고정된 변수로 되었다. 무정형 실리콘으로 제작된 P-N 접합의 물리적 성질로부터 전류 I 를 유도하면 식(1)과 같다.

$$I = I_L - I_o (e^{q(V + IR_s)/nkT} - 1) \quad (1)$$

여기서 q 는 전하량 $1.602e-19$ 이고, k 는 Boltzman's constant로 $1.38e-23$ 이다. 또한 온도의 변화에 대한 광전류는 식(2)와 같다.

$$I_L = I_{L(T_1)} (1 + K_o (T - T_1)) \quad (2)$$

식(2)의 $K_o = (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)}) / (T_2 - T_1)$ 이다. 온도에 따른 다이오드 포화전류 I_o 는 식(3)에서와 같다. 또한 식(3)를 T_1 시간에 대해서 풀면 식(4)와 같다.

$$I_o = I_{o(T_1)} * (T/T_1)^{3/n} * e^{-qV_o/nk * (1/T - 1/T_1)} \quad (3)$$

$$I_{o(T_1)} = I_{SC(T_1)} / (e^{qV_{oc(T_1)}/nkT_1} - 1) \quad (4)$$

실험을 통해 보여진 I-V 특성곡선에서 R_s 에 대해서 정리하면 식(5)과 같다.

$$R_{s0} = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} + \frac{1}{(X_{1v} + X_{2v} + \frac{1}{R_p})} \right] \quad (5)$$

여기서, $X_{1v} = \frac{eI_{s1}}{kT} e^{(\frac{eV_{oc}}{kT})}$, $X_{2v} = \frac{eI_{s2}}{AkT} e^{(\frac{eV_{oc}}{AkT})}$ 이다. 또한, $1/R_p$ 의 값은 작아서 무시할 수 있으므로 R_{s0} 는 식(6)과 같다.

$$R_{s0} = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} + \frac{1}{X_{1v} + X_{2v}} \right] \quad (6)$$

실제로, 식(6)은 대략 R_s 와 같은 값이다. 따라서 R_s 은 식(7)과 같다.

$$R_s = -dV/dI_{V_{oc}} - 1/X_v \quad (7)$$

위의 식에서 일부 방정식들은 Solar Cell의 물리적으로 주어진 고유특성을 지닌 PV 어레이의 제작사들의 평가 시험에 의해 어레이의 I-V 곡선이 결정되고 측정될 수 있다.

4. Simulation

광전류 I_L (A)은 일사량 G (Wm^{-2})에 직접적으로 비례하므로 Solar Cell이 단락회로로 되었을 때, 매우 적은 양의 전류가 다이오드를 통해 흐르므로 식(8)에 있는 비례상수와 함께 쓰일 수 있다.

$$I_{L(T_1)} = G * I_{SC(T_1, nom)} / G_{(nom)} \quad (8)$$

폐회로전류 I_{SC} 의 비율은 일사량 G (Wm^{-2})의 동일한 비율인 일반적으로 $1000 Wm^{-2}$ 을 전달된다.

본 실험에 적용된 범용 PV Cell의 파라미터와 사양표는 다음의 표1과 같다.

Table 1. PV Cell Parameter (범용 설정)

단락전류 I_{sc}	3.35 A]
개방전압 V_{oc}	22 V]
최대전력 P_m	53 W]
최대전력점에서 전류 I_m	3.1 A]
최대전력점에서 전압 V_m	17.2 [V]

식(2)에서 보는 바와 같이 온도의 변화에 따라서 광전류 I_L 이 선형적으로 변하고 따라서 온도를 25° 에서 75° 로 변화시킴에 따라 I_L 을 3.5에서부터 3.6 [A]로 약 3% 변화시켰다. 즉, $I_{SC}=3.35A$ ($1000 Wm^{-2}$ $T_1=25^\circ C$)이고 $I_{L(T_1)}=3.35A/1000 Wm^{-2}$ 로 설정하였다. 시뮬레이션에 적용된 Solar Cell은 직렬 저항값을 $R_s=8m\Omega$ 로 계산하였다. $25^\circ C$ 에서의 충전전류 I_o 의 값은 식(6)처럼 이 온도에서의 개방회로전압과 폐회로전류에 의해서 계산된다.

전류 I 는 이러한 파라미터를 이용하여 전압, 일사량, 온도의 변동에 대한 동작점을 확인하도록 한다. 시뮬레

이전 과정중 하나의 입력변수가 벡터이면 출력변수가 마찬가지로 벡터이다. 반복 연산과정에서 Newton Raphso n Method 가 양과 음의 전류를 더욱 빠르게 보상하기 위해서 이용되었다.

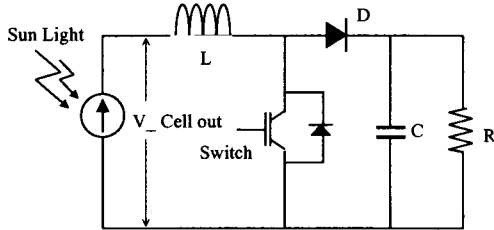


Fig. 2 Boost MPPT Block Diagram

최대 전력점 추적은 전력전자분야에서 이용되는 DC-DC 컨버터를 PV 모듈 사이에 삽입시켜 그것의 부하가 최적의 상태에 도달시키는 것이다. PV 모듈이 온도, 일사량, 그리고 부하의 변동 하에서도 항상 최대 전력점에서 동작하도록 유지시키기 위해 Boost 컨버터 토폴로지를 이용하였다.

Matlab 모델에 적용되는 부하는 12 [V] 납축전지를 가정한다. 이것은 전압이 12V에서 13.8V까지 변하는데 이것은 저전력 독립형 PV 배터리 시스템의 전형적인 형태를 이용하기 위해서이다.

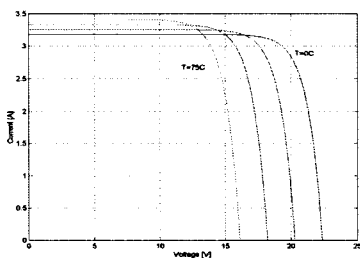


Fig. 3 V-I Characteristics Curves for Temperatures from 0, C to 75, C

그림 3은 0°C에서 부터 75°C 까지 온도의 변화에 따른 V-I 특성곡선을 보여준다.

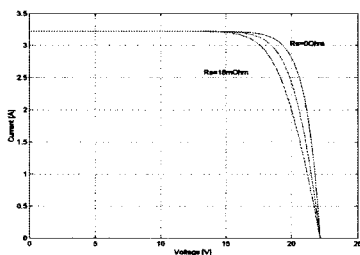


Fig. 4 V-I Characteristics Curves for Resistance from 0m [Ω] to 16m [Ω]

그림4는 R_s 를 각각 $0 m[\Omega]$, $8 m[\Omega]$, $16 m[\Omega]$ 로 변화

시킨 Solar Cell의 V-I 특성곡선을 보여준다.

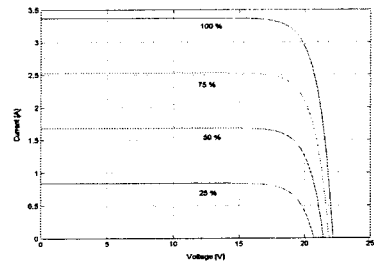


Fig. 5 V-I Characteristics Curves for Irradiance from 25% to 100%

그림 4는 25%에서 100%까지 변화시키면서 Solar Cell의 V-I 특성곡선을 보여준다. 이때, 100%의 일사량에 대해서 $1000 Wm^{-2}$ 로 설정한다.

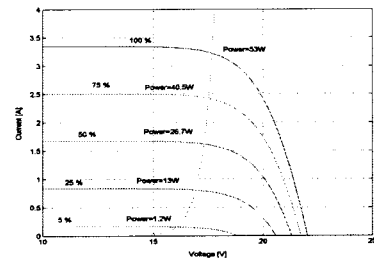


Fig. 6 Maximum Power Point of Designed PV Module for Various Irradiance

그림 6은 5%의 일사량부터 100%까지 일사량의 변동에 따른 V-I 출력특성곡선으로부터 Boost 컨버터를 이용하여 최대 전력점을 매칭시키는 것을 보여준다.

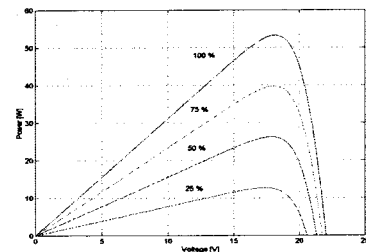


Fig. 7 PV Array Characteristics Curve for Maximum Power Point

그림 7은 일사량의 변동에 따른 최대 전력점을 나타낸 V-P 특성곡선이다. 시뮬레이션의 결과, 최대 전력점이 일사량의 증가함에 따라 지수함수적으로 증가함을 확인할 수 있다.

시뮬레이션이 적용된 시스템은 PV 모듈과 배터리 사이의 단상 직렬 블록킹 다이오드가 있고, 배터리의 부하가 최대 일때 전압 분로 레귤레이터가 병렬로 연결된

다. 일반적인 레귤레이터의 위치는 직렬 IGBT 스위치가 PV 모듈과 배터리 사이에 놓여진다. 이런 레귤레이터는 모듈전류가 0이 되거나 역방향으로 될 때, 또는 배터리의 전하가 가득 찰 때 모듈과 차단시키는 역할을 한다. 이러한 방법은 IGBT스위치가 닫힐 때 매우 낮은 전압 강하 방향이 되므로 유리하다.

5. 결 론

태양광 발전시스템에 이용되는 범용 Solar Cell에 대한 모델링을 수행하였고 모델링 된 모델은 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 시뮬레이션을 통해 태양광의 일사량과 온도의 변화량에 대해서 모델링된 Solar Cell은 전압 벡터에 대한 전류벡터의 변화량으로 나타났다. 시뮬레이션의 결과, 설계된 Solar Cell 모델은 직접 PV 모듈-배터리로 연결하여 Boost 컨버터 방식의 최대 전력점 추적(MPPT)알고리즘의 일사량과 온도의 변화에 대한 동작을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. A. Gow, C. D. Manning "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies." IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no.2, pp.199-200, March 1999
- [2] Tomas Markvart "Solar Electricity", October 2000, John Wiley & Sons, LTD
- [3] Geoff Walker "Evaluationg MPPT converter Topologies using a Matlab PV Model", IEAust, Vol. 21, 2001, pp.49-56,
- [4] 유권중, 정영석, 최주엽 "새로운 고효율 MPPT 제어 알고리즘 고찰" 한국태양에너지학회 Vol. 22. 2002. No3. pp.11-20,