

태양광 시스템의 최대 전력지점 추적(MPPT) 정확도 향상을 위한 모델링

이영현* · 이종환**

**상명대학교 시스템반도체공학과

Improved Model for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Solar System

YoungHyun Lee* and Jonghwan Lee**

**Department of System Semiconductor Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

The photovoltaic system is affected by various conditions such as temperature and irradiance. Because non-uniform irradiation and partial shading conditions affect the entire string of cells connected in series, a bypass diode is used to bypass the current flow normally. In order to find the maximum power point in partial shade conditions, it is necessary to estimate various methods of maximum power point tracking. In this paper, the hybrid method of MPPT using Lambert W function and perturbation & observation algorithm is proposed under partial shading conditions. The simulation results are obtained using MATLAB/Simulink and shows the improvement of the accuracy of MPPT.

Key Words : Partial Shading, Photovoltaic System, Perturbation & Observation, Lambert W Function, Maximum Power Point, Maximum Power Point Tracking

1. 서 론

최근 환경에 관한 관심이 증가하고, 그린뉴딜로 인한 친환경 에너지 산업의 개혁을 통해 재생 에너지의 중요도가 급증하고 있다 [1][2][3]. 태양광 발전은 기존의 에너지 생산에 비해 친환경적이지만 온도, 일사량 등의 여러 조건에 영향을 받고, 해가 없는 밤에는 에너지 생산이 불가능하다는 단점이 있다. 태양광 발전에서 균일하지 않은 일사량과 부분 음영(partial shading) 조건은 일반적으로 에너지 생산에 영향을 준다 [4]. 여러 조건에 의해 에너지 생산에 영향을 받고 생산할 수 있는 시간이 한정적이기 때문에 에너지를 생산할 때 최대 효율을 가져야 기존의 에너지 생산을 대체할 수 있다. 따라서 외부 요인에 의해

나타나는 부분 음영 조건에서 에너지 생산을 개선하여 최대 효율을 나타내는 부분 음영 조건을 해결하기 위해 일반적으로 바이패스 다이오드(bypass diode)를 사용하여 방지한다 [5]. 직렬로 연결된 셀 스트링에서 모든 셀이 동일한 전류를 전달하게 된다. 여기서 하나 이상의 셀에 부분 음영 처리되면 최대 허용 전류가 감소하고, 결과적으로 출력이 감소한다. 하지만 바이패스 다이오드를 사용하면 셀에서 생성된 전류가 다른 셀에 비해 작아졌을 때 전류의 흐름을 바이패스 다이오드를 통해 우회하여 정상적으로 전류가 흐를 수 있게 된다. 바이패스 다이오드를 이용한 모델링을 통해 부분 음영 조건에서 다양한 방법으로 정확한 전력지점을 찾아내는 모델이 필요하다.

본 논문은 1장에서 서론, 2장에서 바이패스 다이오드를 통해 I-V, P-V 특성곡선을 추출하기 위해 일반적인 태양광 모델링을 제시한 후 바이패스 다이오드가 적용된 일반적

†E-mail: jhlee77@smu.ac.kr

인 모델, 람베르트 W 함수(Lambert W function)를 사용한 태양광 모델 2가지를 제시한다. 다음 P&O(Perturbation and Observation) 알고리즘을 제시한다. 3장에서 제시된 모델들을 통해 얻어진 시뮬레이션 결과값을 비교하여 더 정확한 최대전력점을 나타내는 모델을 확인한다. 4장에서는 결론에 대해 기술한다.

2. 태양광 모듈 모델링

태양전지를 통해 생산되는 최대 전력점을 찾기 위해 최대 전력지점 추적(MPPT, maximum power point tracking)이 필요하다. 태양전지로부터 전력 전달 효율이 햇빛, 태양 전지 패널의 온도 및 부하의 전기적 특성에 따라 달라지는 것을 해결하기 위해 최대 전력지점 추적을 사용한다. 위 3가지 조건에서 가장 높은 전력 전송 효율을 나타내는 부하특성이 최대 전력 점(MPP, maximum power point)이다. 전력 전송 효율이 최대일 때 시스템이 최적화된다. 따라서 조건이 변화할 때 부하 특성을 조정하는 프로세스가 최대 전력지점 추적이다. 여러 방법을 적용하여 더 정확한 최대 전력지점을 찾아내는 방법을 MATLAB/Simulink를 사용하여 시뮬레이션 결과값을 제시한다.

2.1 일반적인 태양전지 모델링

일반적이 태양광 모듈의 전류를 구하는 수식은 다음과 같다 [6][7].

$$I = I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1)$$

여기서 R_s 는 직렬저항, R_p 는 병렬저항, a 는 다이오드 상수 값이다. 다이오드 상수 값은 일반적으로 $1 \leq a \leq 1.5$ 의 값을 사용하고 다른 매개변수에 따라 선택하여 적절한 값을 선택한다. I_{ph} 는 광 전류, I_0 는 다이오드 전류로 각각 다음과 같이 나타난다 [6][7].

$$I_{ph} = \left(I_{ph,n} + T_c(T - T_{STC}) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

여기서 $I_{ph,n}$ 는 정격 광 생성 전류, T 는 패널 온도, T_c 는 온도 계수(K), T_{STC} (298K)는 표준 시험 조건(standard test conditions)의 온도, G 는 일사량, G_{STC} 는 표준 시험 조건의 일사량($1000W/m^2$)이다 [6][7].

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 E_g 는 실리콘(Si)반도체의 에너지 밴드갭 ($E_g=1.12eV$), q 는 전하량($1.6 \times 10^{-19}C$), k 는 볼츠만 상수 ($1.38 \times 10^{-23}J/K$), $I_{0,n}$ 는 정격 포화 전류이다. 정격 포화 전류는 다음과 같다 [6][7].

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp(V_{oc,n}/aV_{t,n})-1} \quad (4)$$

여기서 $V_{oc,n}$ 는 정격 개방회로 전압, $V_{t,n}$ 는 직렬 연결된 셀들의 열 전압, $I_{sc,n}$ 는 정격 단락 회로 전류이다.

2.2 부분 음영 조건에서 바이패스 다이오드가 적용된 일반적인 태양전지 모델링

바이패스 다이오드는 직렬 연결된 셀 스트링에서 전류의 흐름을 우회한다. 직렬 연결된 상태에서는 I-V 특성곡선의 전류는 일정하지만 전압이 증가하는 형태로 나타난다 [8]. 바이패스 다이오드의 개수에 따라 P-V 특성 곡선에서 최대 전력점의 개수가 달라진다. 따라서 바이패스 다이오드를 연결한 셀의 I-V, P-V 커브는 Fig. 1과 Fig. 2 같이 나타난다 [8].

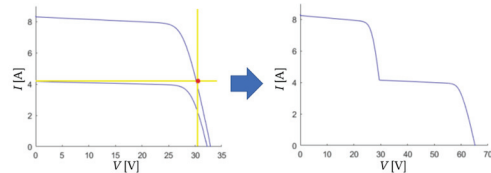


Fig. 1. 바이패스 다이오드 적용시 I-V 특성.

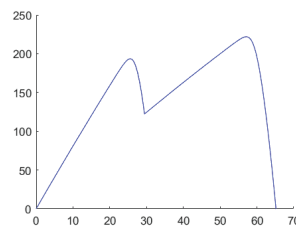


Fig. 2. 바이패스 다이오드 적용시 P-V 특성.

2.3 부분 음영 조건에서 람베르트 W 함수를 사용한 태양전지 모델링

이상적인 태양광 모델은 반복적인 계산을 통해 전류, 전압을 계산할 수 있다. 하지만 람베르트 W 함수를 사용하면 전류, 전압 값을 바로 구할 수 있게 된다 [9]. 람베르트 W 함수를 사용하면 이상적인 태양광 모델보다 더 빠르고 정확한 결과값을 얻을 수 있다. 람베르트 W 함수를

사용하면 기존의 수식을 $I = f(V)$ 로 나타낼 수 있고 식은 다음과 같다 [10][11].

$$I = \frac{R_p(I_{ph}+I_0)-V}{R_s+R_p} - \frac{a}{R_s} W \left[\frac{R_s R_p I_0}{a(R_s+R_p)} \exp \frac{R_s R_p (I_{ph}+I_0)+R_s V}{a(R_s+R_p)} \right] \quad (5)$$

2.4 P&O 알고리즘

MPP를 추적하기 위해 다양한 알고리즘이 사용되고 있으며, 그 중에서 P&O 알고리즘이 대표적으로 사용된다. P&O 알고리즘은 간단한 피드백 구조를 갖는다. 태양전지의 전압을 주기적으로 증감시켜 동작하고, 교란(perturbation) 주기 동안의 태양전지 어레이 출력 전력과 현재 태양전지 어레이 출력 전력을 비교하여 MPP를 연속적으로 추적하며 찾는 방식이다. Simulink에서 P&O 알고리즘의 내부 구조는 다음 그림과 같다 [12].

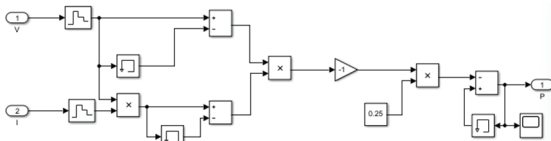


Fig. 3. Simulink에서 P&O 알고리즘 내부 구조.

앞서 제시한 일반적인 태양광에서 추출한 전류와 전압 값을 P&O 알고리즘의 입력으로 사용하여 P&O 알고리즘이 수행된 후 전력 값을 출력하는 방식이다.

3. MPPT 시뮬레이션 비교

2장에서 제시한 수식과 알고리즘을 통해 시뮬레이션을 진행하였고, 각 수식의 변수는 다음 표와 같이 적용하여 진행하였다 [1].

Table 1. 25°C, 1000W/m², A.M 1.5 조건에서 KC 200 GT 모델 파라미터

Parameter	Value
I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
$P_{max,n}$	200.143 W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
K_V	-0.1230 V/K
K_I	0.0032 A/K
N_s	54

Table 2. 정격 동작 조건에서 KC200GT 태양광 모델의 파라미터.

Parameter	Value
I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
$P_{max,n}$	200.143 W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
$I_{0,n}$	$9.825 \cdot 10^{-23}$ A
I_{pv}	8.214 A
a	1.3
R_p	415.405 Ω
R_s	0.221 Ω

부분 음영 조건을 나타내기 위해 임의로 일사량을 조절하여 부분 음영을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 일사량을 1000, 700, 400, 100 W/m²로 설정하고, 온도는 표준 시험 조건인 25°C로 설정하였다. 입력되는 일사량이 4개로 출력되는 I-V, P-V 특성곡선에서 4가지 포인트가 생성된다. 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 사용했고, Simulink의 구성은 Fig.4와 같다 [13][14].

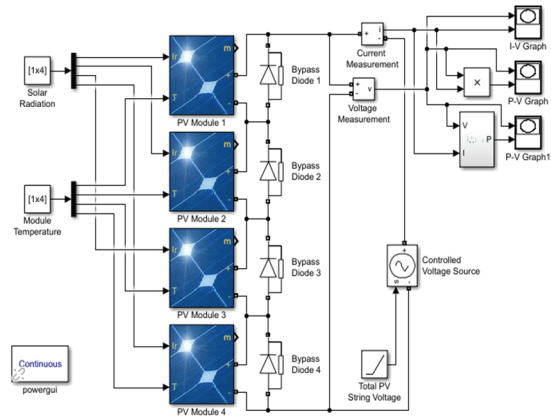


Fig. 4. Simulink 태양광 시스템 구성도.

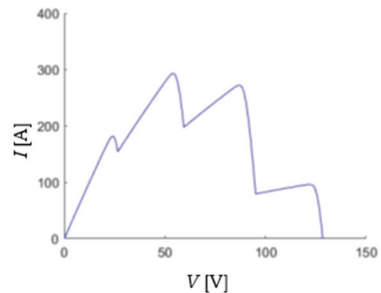


Fig. 5. 부분 음영조건에서 람베르트 W 함수를 이용한 태양광 모델 P-V 특성곡선.

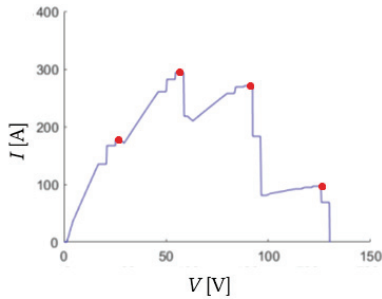


Fig. 6. 부분 음영조건에서 P&O 알고리즘을 적용한 일반적인 태양광 모델 P-V 특성곡선.

시뮬레이션은 조도 값을 4가지로 입력했기 때문에 P-V 특성곡선에서 MPP도 4개가 발생해야 한다. P&O 알고리즘은 사각 펄스이기 때문에 붉은 점으로 표시된 사각 펄스 중앙 부분이 MPP가 된다.

람베르트 W 함수를 사용한 태양광 모델은 일반적인 태양광 모델과 비교하였을 때 큰 차이를 발견하기 힘들다. 하지만 람베르트 W 함수를 사용한 모델과 P&O 알고리즘이 적용된 일반적인 태양광 모델 사이에는 유의미한 결과가 있었다. Fig 4에 설계된 태양광 시스템 구성으로 더 정확한 값이 입력되었고, P&O 알고리즘을 거쳐 data sheet에 더 가까운 값을 표시하게 되었다.

4. 결 론

태양광 시스템을 통해 전력을 생산할 때 가장 중요한 것은 전력 생산량의 정확한 예측이다. 이는 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 더 정확한 결과 값을 찾아내는 것이 필요하다. 일반적인 태양광 모델에서 더 정확한 전력량을 도출하기 위해 다양한 방법을 사용한다. 본 논문에서는 정확도를 올리기 위해 람베르트 W 함수, P&O 알고리즘을 제시한다. 제시한 2가지 방법을 통해 일반적인 태양광 모델보다 정확도가 더 높은 방법을 검증한다. 시뮬레이션 결과 시뮬레이션에 사용한 KC200GT 태양광 모델의 data sheet에 나타난 결과 값에 가장 근접한 모델은 P&O 알고리즘이 적용된 일반적인 태양광 모델로 정확도가 일반적인 태양광 모델과 람베르트 W 함수를 사용한 모델에 비해 더 정확하다.

감사의 글

This work was supported by the International Science & Business Belt support program, through the Korea Innovation Foundation funded by the Ministry of Science and ICT.

참고문헌

1. U. Shahzad, "The Need For Renewable Energy Sources", ITEE Information Technology & Electrical Engineering, Vol. 4, pp. 16-18 2012.
2. J. H. Choi, S. C. Roh, and H. I. Seo, "A Study on Application of Ag Nano-Dots and Silicon Nitride Film for Improving the Light Trapping in Mono-crystalline Silicon Solar Cell," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 18, pp. 12-17, 2014.
3. Y. T. Yoon, E. S. Cho, and S. J. Kwon, "A Study on the Effect of Process Pressure on AZO Thin Films Sputtered for the Windows Layers of CIGS Solar Cells," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, pp. 89-93, 2014.
4. J. Bai, Y. Cao, Y. Hao, Z. Zhang, S. Liu, and F. Cao, "Characteristic output of PV system under partial shading or mismatch conditions", Solar Energy, Vol. 112, pp.41-54, 2015.
5. R. G. Vieira, F. M. U. de Araujo, M. Dhimish, and M. I. S. Guerra, "A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules", MDPI energies, pp.1-21, 2020, 13, 2472.
6. M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," IEEE Transactions on power electronics, Vol. 24, 2009.
7. H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB" NRIAG journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 3, pp53-61, 2014.
8. E. J. Kim, B. G. Yu, H. J. Cha, and G. J. Yu, "Comparison of maximum generated power by shading effect and PV array configurations", Journal of the Korean solar energy, Vol. 29, No.2, pp. 8-13, 2009.
9. E. I. Batzelis, G. Anagnostou, C. Chakraborty, and B. C. Pal, "Computation of the Lambert W function in photovoltaic modeling", Lecture notes in electrical engineering, Vol. 615, pp. 583-595, 2020.
10. E. I. Batzelis, I. A. Routsolias, and S. A. Papathanassiou, "An Explicit PV String Model Based on the Lambert W Function and Simplified MPP Expressions for Operation Under Partial Shading", IEEE Transactions on Sustainable energy, Vol. 5, No. 1, pp. 301-312, 2014.
11. A. Xenophontos, and A. M. Bazzi, "Model-based Maximum Power curves of Solar Photovoltaic Panels under Partial Shading Conditions", IEEE Photovoltaics, Vol. 8, pp.233-238, 2018.
12. J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Development of Improved P&O Algorithm of PV System Considering Insolation variation", Journal of the Korean Institute of illuminating and electrical installation engineers, Vol. 24, pp. 166-176, 2010.

-
13. D. Baimel, S. Tapuchi, Y. Levron, and J. Belilov, "Improved fractional open circuit voltage MPPT methods for PV systems", MDPI electronics, Vol. 8, pp. 1-20, 2019.
14. S. Mohammadnejad, A. Khalafi, and S. M. Ahmadi, "Mathematical analysis of total-cross-tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations", Solar Energy, Vol. 133, pp. 501-511, 2016.
-
- 접수일: 2022년 3월 10일, 심사일: 2022년 3월 18일,
게재확정일: 2022년 3월 25일