

데이터시트 기반의 새로운 PSIM 태양광 모델

박준영¹, 최성진[†]

A New PSIM Model for PV Panels Employing Datasheet-based Parameter Tuning

Jun-Young Park¹ and Sung-Jin Choi[†]

Abstract

In the simulation of photovoltaic (PV) power conditioning systems, PSIM is a widely accepted circuit simulation platform because of its fast speed and C-code support. PSIM provides two kinds of generic PV panel models: functional model and physical model. Whereas the functional model simulates PV in the standard test condition (STC) only, the physical model can emulate changing PV characteristics under varying temperatures and irradiation conditions and is thus more suitable for system simulation. However, the physical model requires complicated parameters from users, and thus it is prone to errors and is difficult to use. In this study, a new PSIM model for PV is presented to solve these problems. The proposed model utilizes manufacturers' datasheet values specified under STC only and excludes user-defined information from input parameters. To achieve good accuracy even in varying environmental conditions, single-diode model parameters are successively tuned to a time-varying virtual datasheet. Comparison with a conventional physical model shows that the proposed model provides more accurate simulation according to error analysis based on the EN50530 standard.

Key words: Photovoltaic (PV) panel, Optimization method, Parameter tuning, PV simulator

1. 서 론

태양광 발전시스템의 개발에서 중요한 이슈는 높은 효율의 시스템을 사용하여 태양광 패널로부터 최대의 에너지를 얻어 내는 것이고 이는 태양광 패널의 특성을 정확하게 파악하여 사용해야 함을 의미한다. 특히, 태양광 PCS (power conditioning system)의 개발과정에서는 다양한 외부환경(온도, 일사량 등)의 변화에 따른 태양광 패널의 동작특성을 파악하고 사용하는 것이 중요한데 실제 패널로는 외부환경의 변화에 따른 특성을 평가하는 것이 어려워서 주로 태양광 시뮬레이터나 시뮬레이션 프로그램을 시스템의 개발과정에 많이 사용하게 된다^[1].

태양광 시뮬레이터는 직접적으로 다양한 조건에서의 태양광 패널의 출력을 표현해 주지만 추가적인 하드웨어가 필요하므로 개발단계에서는 주로 PSIM과 같은 회로 시뮬레이션 프로그램을 많이 이용하게 된다. PSIM을 사용하게 되면 실제 태양광 패널이 없어도 컴퓨터만으로 태양광 시스템의 전체적인 동작특성을 파악할 수 있는데, 이를 위해서 PSIM은 자체적인 두 개의 태양광 패널의 등가회로 모델인 함수 모델과 물리적 모델을 제공하고 있다.

먼저, PSIM의 태양광 패널모델 중 함수 모델은 데이터시트 만으로 태양광 패널의 출력특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 함수 모델은 표준 테스트 조건 (Standard test condition, STC)에서만 성립하며, 변하는 온도나 일사량에 대해서는 모델을 제공할 수 없다는 단점을 가진다. 다음으로 물리적 모델은 온도나 일사량의 변화에 대한 출력값을 얻을 수 있지만, 이를 얻기 위해서 함수 모델 보다 자세한 파라미터의 설정이 필요하며, 파라미터는 사용자에게 의해서 결정되므로 그에 따른 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 PSIM의 태양광 패널을 분석한 뒤에

Paper number: TKPE-2015-20-6-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: sjchoi@ulsan.ac.kr, School of Electrical Engineering, University of Ulsan
Tel: +82-52-259-2716 Fax: +82-52-259-1686

¹ School of Electrical Engineering, University of Ulsan
Manuscript received Sep. 1, 2015; revised Sep. 9, 2015;
accepted Oct. 5, 2015

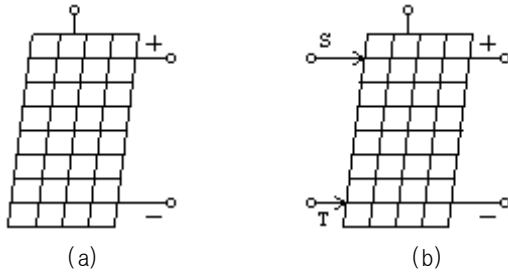


Fig. 1. PSIM solar model. (a) functional. (b) physical.

TABLE I
USER SETTING PARAMETERS FOR FUNCTIONAL MODEL

User setting parameter	Value	Unit
Open circuit voltage(Voc)	32.9	V
Short circuit current(Isc)	8.21	A
Maximum power voltage(Vmpp)	26.3	V
Maximum power current(Impp)	7.61	A

제안모델에 대한 이론을 설명하며, 이를 PSIM의 C block을 사용해서 구현하고 PSIM의 물리적 모델과 제안모델을 비교한다. 그 결과 제안모델은 변하는 온도와 일사량의 조건을 따라서 출력이 바뀌며, 가변환경에서의 시뮬레이션이 가능한 태양광 패널모델을 제공할 수 있음을 증명한다. 이 모델은 추가적인 조건이 필요 없이 데이터시트에서 제공하는 기본적인 정보만으로 태 모델을 구성할 수 있으며, 그 타당성은 PSIM의 태양광 패널 블록과의 비교를 통해서 검증하여 최종 결론을 내렸다.

2. PSIM PV모델 분석

2.1 PSIM의 PV패널 모델

PSIM은 태양광 시스템의 시뮬레이션을 위해서 두 개의 태양광 패널모델을 제공하고 있는데 바로 함수 모델과 물리적 모델이며, 이는 Fig. 1과 같다. 여기서 물리적 모델의 T는 온도를 S는 일사량을 의미하며, 외부적으로 사용자가 설정할 수 있다.

먼저, 함수 모델은 Table 1과 같이 데이터시트로부터 STC에서의 단락전류 (I_{sc}), 개방전압 (V_{oc}), 최대전력지점 (MPP)의 전압 및 전류를 알고 있으면 특정 태양광 패널의 STC에서의 I-V 및 P-V 특성곡선을 쉽고 빠르게 얻을 수 있다^[2]. 하지만 이 모델의 경우는 변하는 온도와 일사량에 대해서는 표현이 불가능하기 때문에 실제 태양광 시스템의 개발과정에서는 사용할 수가 없다.

이 문제는 물리적 모델을 사용해서 해결할 수 있는데 물리적 모델의 경우 태양광 패널의 전기적 등가회로를 사용하는 모델로 내부는 회로적으로 Fig. 2와 같은 싱글 다이오드 등가회로를 사용하고 있다. 여기서 싱글 다이오드 등가회로의 물리적인 비선형 특성을 표현할 수 있

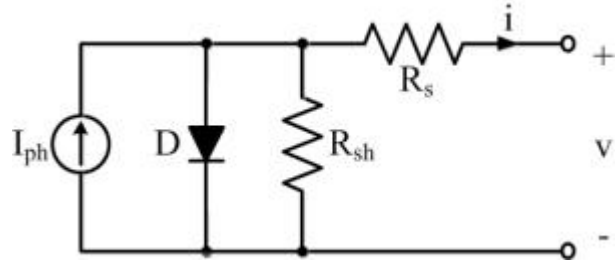


Fig. 2. Single-diode model for PV panel.

는 기본적인 수식은 아래와 같다.

$$i = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{v+iR_s}{N_s A V_T}} - 1 \right) - (v+iR_s) G_{sh} \quad (1)$$

여기서 V_T 는 식(2)로 정의 되고

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

이 때, 각 파라미터는 다음과 같다.

- I_o : 암전류(A)
- I_{ph} : 광 전류(A)
- R_s : 직렬저항(Ω)
- G_{sh} : 병렬컨덕턴스(S)
- N_s : 직렬연결된 PV cell의 수
- V_T : 열전압(V)
- A : 다이오드의 이상계수($1 \sim 2$ for silicon)
- k : 볼츠만 상수($1.602 \times 10^{-19} \text{J/K}$)
- q : 전자의 전하량($1.38 \times 10^{-23} \text{C}$)
- T : 절대온도(K)

물리적 모델은 변하는 온도와 일사량을 입력해주면 그에 따라서 변하는 출력특성을 얻을 수 있으며, 입력 파라미터를 이용한 PSIM의 물리적 모델의 동작원리는 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 물리적 모델의 경우 싱글 다이오드 모델의 파라미터 R_s , R_{sh} , A, I_{ph} , I_o 를 이용해서 I-V 및 P-V 특성곡선을 얻는 것이 가능하며, PSIM의 모델은 R_s , R_{sh} , A의 변화는 없이 I_{ph} 와 I_o 만을 온도와 일사량에 따라서 값을 바꾼다. 그리고 변하는 I_{ph} 와 I_o 를 이용해서 가변환경에 대한 출력 그래프를 제공하게 된다^{[2][3]}.

하지만 최근의 연구동향을 살펴보면 실제 태양광 패널의 경우 내부 파라미터 R_s , R_{sh} , A 또한 온도와 일사량에 따라서 변하지만^[4] PSIM의 모델은 이를 고려하지 않았으며, 물리적 모델을 사용함에 있어서 사용자는 Table 2와 같이 태양광 패널의 싱글 다이오드 등가회로의 구성에 필요한 직렬저항 (R_s), 병렬저항 (R_{sh}), 암전류 (I_o), 반도체의 밴드 갭 에너지 (E_g), 다이오드의 이상계

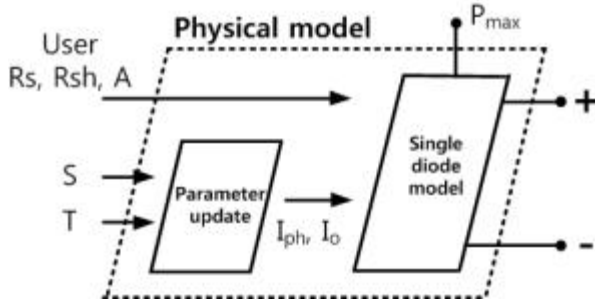


Fig. 3. Block diagram of physical model in PSIM.

TABLE II

USER SETTING PARAMETERS FOR PHYSICAL MODEL

User setting parameter	Value	Unit
Number of cells(Ns)	54	-
Standard light intensity(S0)	1000	W/m ²
Ref. temperature(Tref)	25	K
Series Resistance(Rs)	0.0061	Ω
Shunt Resistance(Rsh)	1000	Ω
Short circuit current(Isc0)	8.21	A
Saturation current(Is0)	3.97e-10	A
Band energy(Eg)	1.12	eV
Ideality factor(A)	1.2	-
Temperature coefficient(Ct)	0.2614	mA/K

수 (A) 등의 파라미터를 직접 입력해야 한다. 이는 결국 추가적으로 태양광 패널의 등가회로 파라미터를 추출하는 방법이 필요하거나 반복적인 과정을 통해서 적절한 값을 얻을 필요가 있다는 것을 의미하며, PSIM에서는 물리적 모델의 파라미터를 추출해주는 Solar module이라는 유틸리티를 이용하도록 권장하고 있다.

2.2 PSIM의 solar module utility

PSIM에서 제공하는 파라미터 추출 프로그램은 Fig. 4와 같다. 이 프로그램은 데이터시트의 값과 함께 사용자가 직접 R_{sh}, A와 함께 V_{oc}에서의 기울기를 입력하면 나머지 파라미터 R_s와 I₀ 등을 추출해주는 것이다. PSIM에서 제공하는 파라미터 추출방법의 핵심은 R_s에 대해서 추출하는 것으로 이때 파라미터의 추출은 V_{oc}에서의 기울기 조건인 아래의 식을 이용하며, 더 자세한 수식은 문헌[3]으로부터 확인 할 수 있다.

$$R_s = - \left. \frac{dv}{di} \right|_{@V_{oc}} \quad (3)$$

프로그램을 이용하기 위해서 V_{oc}에서의 기울기를 얻는 유일한 방법은 데이터시트로부터 I-V곡선을 직접 작

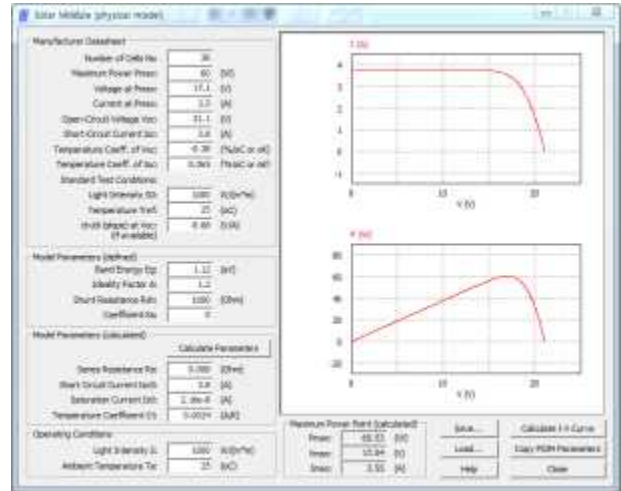


Fig. 4. PSIM solar module utility.

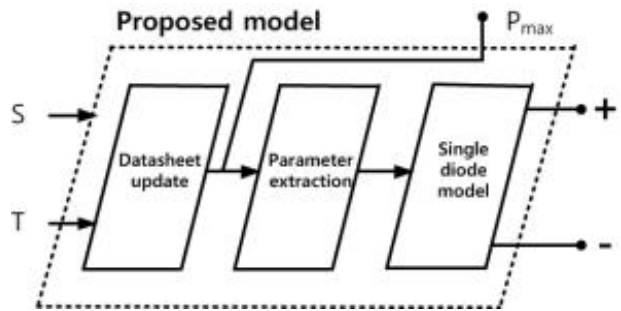


Fig. 5. Block diagram of proposed model in PSIM.

도하는 것이다. 그리고 나머지 입력 파라미터인 A와 R_{sh}의 경우 태양광 패널의 출력곡선을 맞추기 위해서 사용자가 직접 반복적으로 입력해야 하는 값이다. 결국 이 방법은 사용자가 시행착오적인 과정을 통해서 최적의 값을 찾을 때까지 반복할 필요가 있다. 시행착오적인 과정은 모델의 오차원인이 될 수 있으므로 시행착오적으로 반복을 하는 것을 개선하고 사용자의 개입을 최소화하기 위해서 본 논문은 최적화를 사용하는 모델을 제안한다.

3. 제안하는 PV패널모델

3.1 제안모델의 구성

제안모델의 대략적인 블록도는 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다. 제안모델의 목적은 데이터시트의 값과 온도 및 일사량의 정보만을 입력 받은 뒤에 변하는 온도와 일사량의 조건을 따라서 내부 파라미터의 변화를 모두 표현하고 추종할 수 있는 모델을 제공하는 것이며, 이를 위해 제안방법은 최적화 방법을 사용하여 파라미터의 추출속도를 빠르게 하였다. 그리고 변하는 파라미터의 값은 STC에서의 값에 기초하기 때문에 제안방법은 추출 초기에 STC에서의 파라미터들을 추출하고 이를 기반으

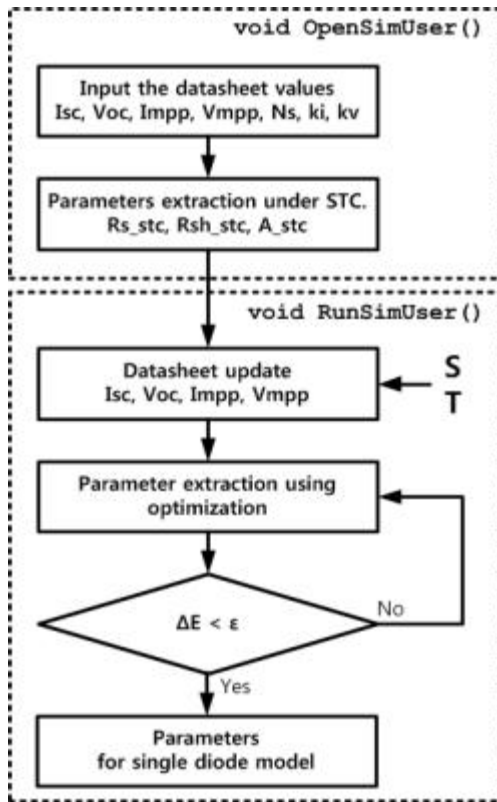


Fig. 6. Flow chart of the proposed PSIM model.

로 해서 변하는 온도와 일사량에 대한 초기값을 결정 한 뒤에 최종 파라미터를 추출하게 된다. 결과적으로 사용자는 온도와 일사량의 정보와 함께 데이터시트에서 제공하는 정보만 알고 있으면 쉽게 제안모델을 사용할 수 있다. 결국, 제안모델의 흐름도는 최종적으로 Fig. 6과 같이 구성된다.

3.2 가상 데이터시트 갱신

실제 태양광 패널의 사용환경은 일사량과 온도가 실시간으로 변하며, 패널의 출력은 주로 여기에 영향을 받는다. 이를 위해서 STC뿐만 아니라 환경에 따라 변하는 출력을 예측할 수 있어야 하며, 이를 위한 다양한 방법들이 존재하지만 대부분의 경우 온도와 일사량에 따라서 패널의 전류와 전압이 특정 비율에 따라서 변한다고 가정하고 모델링을 실시한다. 하지만 실제 태양광 패널에서는 전류나 전압뿐만 아니라 R_s , R_{sh} , A 와 같은 내부 파라미터 또한 환경에 따라서 바뀌며^[4], 이를 표현하기 위해서 제안모델은 데이터시트로부터 제공되는 단락전류와 개방전압의 온도에 대한 변화율 정보를 이용할 수 있다.

태양광 패널의 데이터시트에서는 패널의 단락전류와 개방전압이 온도에 따라 변하는 비율을 제공하는데 이는 k_i 와 k_v 로 표현한다. 그리고 데이터시트는 MPP값에 대한 온도변화율은 제공하지 않고 있지만 문헌[5][6]를

참고하여 식(4)의 근사식을 사용할 수 있다. 근사식은 문헌 [5]에서 P_{mpp} 를 추정하기 위해서 이미 사용된 바 있으나 본 논문은 이를 새롭게 데이터시트 기반의 파라미터 추출법과 결합하여 실시간 시뮬레이션을 시도하였다.

$$k_{i,mpp} \cong k_i, k_{v,mpp} \cong k_v \quad (4)$$

여기서 $k_{i,mpp}$ 와 $k_{v,mpp}$ 는 각각 MPP에서의 전류와 전압의 온도변화율을 의미한다. 이때, 제안방법은 식(4)의 근사식이 성립하지 않으면 오차가 발생할 수 있으나 전류의 온도변화율의 경우 패널에 따라서 차이가 발생할 수 있지만, 식(5)와 (7)에서 볼 수 있듯이 표준 테스트 조건에서의 일사량(S_{stc})에 의해서 나뉘기므로 그 영향은 적다. 그리고 전압의 온도변화율은 오차 범위가 5%이내로 비슷한 값을 가지므로 근사가 가능하며, 다양한 재질의 패널에서도 성립하기 때문에 응용에는 문제가 없을 것으로 판단된다^[6].

따라서 온도와 일사량의 변화를 모두 표현하는 수식은 다음과 같이 정리할 수 있다^{[4][7][8]}.

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \frac{S}{S_{STC}} [1 + k_i(T - T_{STC})] \quad (5)$$

$$V_{oc} = V_{oc,STC} + N_s A_{STC} V_T \ln\left(\frac{S}{S_{STC}}\right) + k_v(T - T_{STC}) \quad (6)$$

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \frac{S}{S_{STC}} [1 + k_{i,mpp}(T - T_{STC})] \quad (7)$$

$$V_{oc} = V_{oc,STC} + N_s A_{STC} V_T \ln\left(\frac{S}{S_{STC}}\right) + k_{v,mpp}(T - T_{STC}) \quad (8)$$

제안모델에서는 위의 수식을 통해서 변하는 온도와 일사량에 대해서 새로운 데이터시트 정보를 갱신하고 이를 이용해서 바뀐 환경에서의 새로운 파라미터 R_s , R_{sh} , A , I_{ph} , I_0 의 정보를 추출할 수 있다. 그 결과 제안방법은 데이터시트의 정보만을 이용해서 변하는 온도 및 일사량의 조건하에서의 태양광 패널의 가상적인 데이터시트 값을 설정할 수 있다.

3.3 데이터시트 기반 회로 파라미터 추출

태양광 패널의 파라미터를 추출하는 방법에 대한 다양한 연구가 최근까지 진행되어 왔지만, 주로 실제 태양광 패널의 출력을 측정 한 뒤에 이를 이용해서 등가회로의 파라미터를 추출하는 방법^[9]과 데이터시트만으로 모델의 파라미터를 추출하는 방법^{[10][11]}이 존재하는데 데이터시트 기반의 방법은 실제 패널이 없어도 등가회로 모델을 얻을 수 있으며, 또한 빠르고 쉽게 모델을 제공한다는 장점이 있다. 이러한 데이터시트 기반의 파라미터 추출방법은 주로 수치해석적인 방법을 사용해서 전기적

```

Step 1: Choose initial  $X_1, N_c(\text{number of cycle})$ 
        Determine the  $\varepsilon$  : tolerance
        Calculate  $f(X_1)$ ;
        Set  $j = 1$ ; (initialize powell cycle)
        For  $i = 1$ ; (initialize univariate cycle)
             $S_i = e(\text{univariate step})$ 
Step 2: For each cycle  $j$ 
        For  $i = 1:3$ ;
            If  $(j \geq 2)$   $S_i = S_i + 1$ 
             $X_{i+1} = X_i + \alpha_i \cdot S_i$ 
             $\rightarrow \alpha$  is determined by minimizing  $f(X_{i+1})$ 
            End (i cycle)
             $S_j = X_4 - X_1$ 
             $X_j = X_4 + \alpha_j \cdot S_j$ 
            Calculate  $f(X_j)$ 
Step 3:  $\Delta f = f(X_{j+1}) - f(X_j)$ 
         $\Delta X = X_{j+1} - X_j$ 
        If  $|\Delta f| \leq \varepsilon$ ; stop
        If  $\Delta X^T \Delta X \leq \varepsilon$ ; stop
        If  $j = N_c$ ; stop
         $X_1 = X_j$ ;
         $j = j + 1$ ;
        Go to Step2
  
```

Fig. 7. Pseudo code of Powell's optimization.

등가회로의 파라미터를 추출한다. 이는 실제 추출해야 하는 파라미터의 수와 데이터시트의 정보로부터 얻을 수 있는 수식의 수가 일치하지 않기 때문이다. 이 문제를 극복하기 위해서 기존의 방법은 추가적인 근사조건을 사용하거나 직렬저항이나 병렬저항을 제거하여 보다 단순한 등가회로를 구성하였다^[12].

제안모델에서는 앞선 문제를 극복하기 위해서 파월 최적화 방법^[13]을 사용하였으며, 파월 방법의 수도코드는 Fig. 7과 같이 표현할 수 있다. 이 방법은 전기적 등가회로의 물리적인 의미를 최대한 살리면서 추가적인 근사조건을 사용하지 않고도 동시에 모든 파라미터를 추출할 수 있다는 장점을 가진다. 이는 데이터시트 정보만으로 모든 파라미터를 얻을 수 있음을 의미하며, 추출속도 또한 빠르기 때문에 파라미터의 추출 후 PSIM의 모델을 거치지 않고 직접적으로 변하는 온도와 일사량에 대한 정보를 제공하는 모델을 만들 수 있다.

제안모델에서 최적화 방법을 사용하여 전기적 등가회로의 파라미터를 추출하기 위해서는 먼저 목표함수의 설정이 이뤄져야 한다. 목표함수는 이어지는 과정을 통해서 얻을 수 있으며, 이때 추가적인 조건이나 근사화, 그리고 회로적인 생략을 사용하지 않았다. 그리고 통상적으로 태양광 발전 시스템이 최대전력지점 추종방법(MPPT)을 사용한다는 점을 고려해 볼 때, 최대전력지점(MPP)부근의 정확도가 중요함을 의미하므로 목표함수는 MPP의 정보만을 이용해서 유도하였다. 그 방법은

기본수식인 식(1)과 데이터시트로부터 얻을 수 있는 4가지 조건인 단락전류(I_{sc}), 개방전압(V_{oc}), MPP, P-V곡선의 MPP로부터의 기울기조건을 이용 하였으며, 이 과정을 통해서 목표함수 및 나머지 파라미터 추출식을 얻을 수 있다.

먼저, 목표함수는 MPP에서의 두 개의 조건을 이용해서 구할 수 있으며, 먼저 기본 식(1)과 MPP의 조건을 이용해서 얻은 수식은 다음과 같다.

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{N_s A V_T}} - (V_{mpp} + I_{mpp} R_s) G_{sh} \quad (9)$$

위의 식은 추가적인 유도과정이 없이 바로 아래의 음함수 형태로 바꿀 수 있다.

$$f(R_s, G_{sh}, A) - I_{mpp} = 0 \quad (10)$$

다음으로 MPP에서의 기울기 조건을 이용하기 위해서 아래의 미분과정을 이용하고

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(iv)}{dv} = i + \frac{di}{dv} v \quad (11)$$

위 식에 MPP의 조건을 대입하면 식(12)를 얻을 수 있고

$$\frac{dp}{dv} \Big|_{i_{mpp}} = I_{mpp} - V_{mpp} \frac{G_{sh} \left(\frac{(I_{sc}/G_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s) e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{N_s A V_T}} + 1}{N_s A V_T} \right)}{1 + R_s G_{sh} \left(\frac{(I_{sc}/G_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s) e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{N_s A V_T}} + 1}{N_s A V_T} \right)} = 0 \quad (12)$$

식(12)는 아래의 음함수 형태가 된다.

$$g(R_s, G_{sh}, A) = 0 \quad (13)$$

앞서 구한 두 개의 음함수를 이용하면 목표함수를 아래와 같이 설정할 수 있으며, 태양광 패널의 내부 파라미터는 목표함수를 최소로 하는 값으로 추출된다.

$$E(R_s, G_{sh}, A) = (f(R_s, G_{sh}, A) - I_{mpp})^2 + g^2(R_s, G_{sh}, A) \quad (14)$$

제안방법은 목표함수를 통해서 추가적인 조건이나 근사화 및 회로적 생략을 사용하지 않고 두 개의 MPP조건만을 사용하여 3개의 미지수 R_s , R_{sh} , A 를 구할 수 있으며, 이는 물리적인 의미도 훼손하지 않는다. 그리고 남아 있는 I_{sc} 와 V_{oc} 조건은 나머지 2개의 미지수 I_{ph} 와 I_0 를 구하기 위해서 사용할 수 있으며, 그 식은 아래와 같다.

$$I_{ph} = I_0 e^{\frac{V_{oc}}{N_s A V_T}} + V_{oc} G_{sh} \quad (15)$$

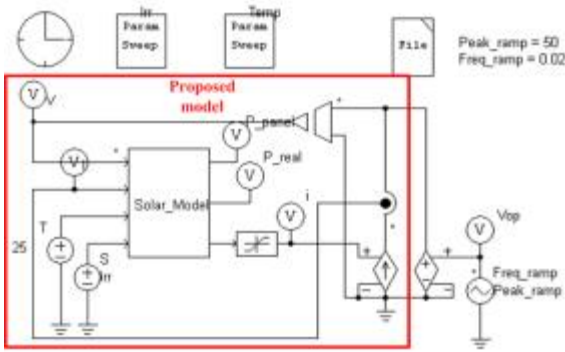


Fig. 8. Testing of the proposed model.

$$I_o = [I_{sc} - (V_{oc} - I_{sc}R_s)G_{sh}]e^{-\frac{V_{oc}}{N_sAV_T}} \quad (16)$$

결과적으로 제안모델은 최적화 방법을 통해서 4개의 데이터시트 조건만으로 5개의 전기적 등가회로의 미지수를 모두 구할 수 있으며, 앞서 설정한 온도 및 일사량에 대한 패널의 동작점 갱신을 통해서 가변환경에서의 출력 또한 쉽게 얻을 수 있다.

4. 기존모델과 제안모델의 비교 및 검증

4.1 제안 PSIM 모델의 구현

제안방법의 구현은 PSIM을 이용하였으며, 이때 비교 대상은 온도와 일사량의 변화도 비교가 가능한 PSIM의 물리적 모델로 하였다. 태양광 패널을 모델링 하기 위한 다양한 기존방법이 존재하지만 PSIM을 통해서 블록화된 모델은 존재하지 않으며, 본 논문의 취지는 제안방법을 PSIM만으로 구성하여 자동화하고 사용성을 증대시키는 것이므로 PSIM의 모델과의 비교를 통해 검증하는 것이 적절하다고 판단하였다.

제안모델은 PSIM의 C block으로 구현하였고 C block을 사용하는 경우 DLL과 같이 추가적인 프로그램이 필요하지 않고 PSIM만으로 C언어를 이용해서 알고리즘을 구현할 수 있다. 그리고 PSIM을 사용하는 것이 데이터시트로부터 도통 손실이나 스위칭 손실과 같은 회로적인 특성을 잘 표현할 수 있으므로 향후 태양광 시스템에도 모델을 적용한다고 생각하면 확장성 면에서나 회로적인 면에서 더 유리하다고 판단된다^[14].

이때 파라미터의 실시간 갱신에 사용된 최적화 방법은 파웰 방법으로 이 방법은 해를 찾는 과정에서 미분식을 사용하지 않아 구현이 간단하며, 빠른 수렴속도 또한 보장하는 방법이다. 시뮬레이션 모델의 특성상 시뮬레이션 시간을 고려해야 하므로 적절한 방법이라 할 수 있다. 그 결과 제안모델의 블록도는 Fig. 8와 같이 나타난다. 여기서 제안모델과 PSIM의 모델을 이용해서 각각 추출한 P-V 특성곡선을 서로 비교해서 제안모델의 타당성을 검증할 수 있다.

TABLE III
DATASHEET VALUES OF KC200GT PANEL

Electrical performance under STC	Value	Unit
Maximum power(Pmax)	200 (+10%/-5%)	W
Number of cells(Ns)	54	-
Short circuit current(Isc)	8.21	A
Open circuit voltage(Voc)	32.9	V
Maximum power current(Impp)	7.61	A
Maximum power voltage(Vmpp)	26.3	V
Temperature coefficient of Voc	-0.123	V/°C
Temperature coefficient of Isc	3.18·10 ⁻³	A/°C

추가적으로 최적화 방법을 사용하기 위해서는 초기값 및 탐색범위를 설정해야 하는데 제안모델의 경우 아래와 같이 탐색범위를 설정하였다.

$$0 \leq R_s \leq \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (17)$$

$$0 \leq G_{sh} \leq \frac{I_{sc} - I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (18)$$

$$0 \leq A \leq 2 \quad (19)$$

탐색범위는 모델의 물리적인 의미를 훼손하지 않는 범위로 설정 되었으며, 탐색범위를 이용해서 초기값은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$X_1 = [R_{s,1} G_{sh,1} A] = [0, 0, 1] \quad (20)$$

결과적으로 이를 이용해서 제안방법의 파라미터가 빠르게 최적화를 통해서 갱신되는 것을 확인할 수 있으며, 이때 사용자에게 의한 작도 등의 추가적인 추출방법이 없이 데이터시트 값만으로 한 번에 태양광 패널모델이 생성된다.

4.2 제안모델의 검증

제안모델의 타당성 검증은 실제 태양광 패널 중 실리 콘 타입의 결정형 패널 KC200GT를 사용하여 실제 패널의 데이터와 각 모델의 결과를 추출하고 EN50530의 기준에 따라서 결과를 비교하는 것으로 진행하였다. KC200GT의 경우 제조사로부터 제공되는 데이터시트가 명확하고 많은 선행논문에서 사용해진 패널이며, 온도와 일사량의 변화에 대한 결과그래프 또한 제조사에서 제공하고 있기 때문에 이를 이용하여 제안모델과 PSIM 모델의 비교검증에 사용하였다. 제안모델이 모델을 구성

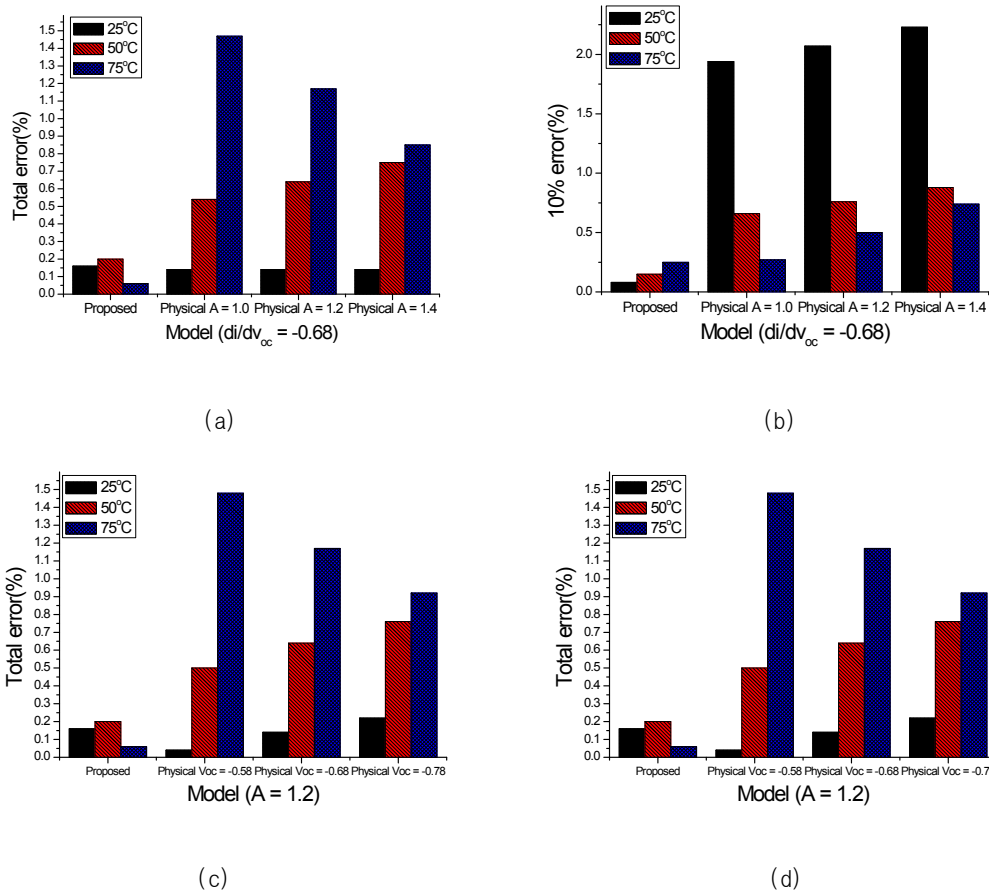


Fig. 10. Model accuracy under varying temperature.

하기 위해서 필요로 하는 KC200GT 패널의 데이터시트 값은 Table 3에 나타내었다. 표의 값은 제조사가 STC에서 실험을 통해서 얻은 데이터로서 데이터시트 기반의 태양광 패널 모델링에 유용하게 사용될 수 있다.

다음으로 EN50530의 평가기준은 태양광 시뮬레이터의 MPP부근에서의 허용오차에 대해서 규정하고 있으며, 이는 제안모델과 PSIM의 모델이 파라미터에 따라서 어느 정도의 오차를 가지는지 평가하는 기준으로 사용하였다. 이때, 규격에 따른 오차는 아래의 수식으로 정의할 수 있다^[15].

$$Total \epsilon_p = \frac{1}{V_{oc}} \int \left| \frac{P_{model}(v) - P_{measured}(v)}{P_{measured}(v)} \right| dv \quad (21)$$

$$MPP \pm 10\% \epsilon_p = \frac{1}{0.2 V_{mpp}} \int_{0.9 V_{mpp}}^{1.1 V_{mpp}} \left| \frac{P_{model}(v) - P_{measured}(v)}{P_{measured}(v)} \right| dv \quad (22)$$

위 식은 각각 P-V 특성곡선의 전체오차와 MPP부근의 오차를 의미하고 여기서 model은 제안모델과 PSIM 모델로부터 얻은 값을 의미하며, measured는 KC200GT 패널의 데이터시트로부터 얻은 각각의 온도와 일사량에서의 P-V 특성곡선의 값을 의미한다.

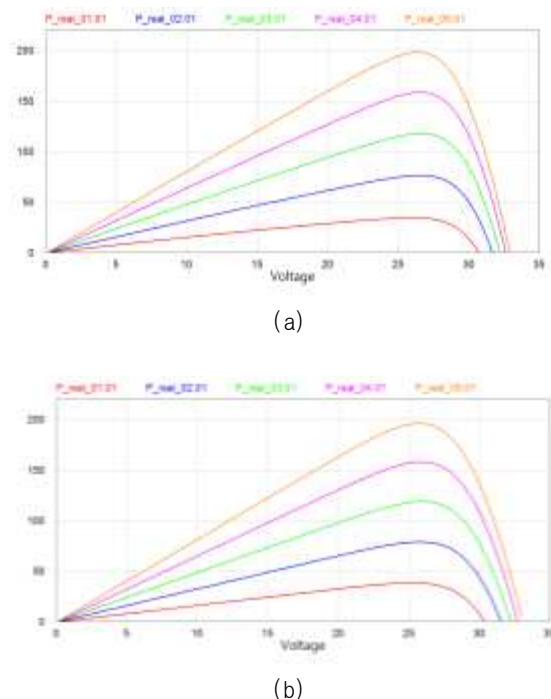


Fig. 9. P-V curve of PV model. (a) proposed (b) physical

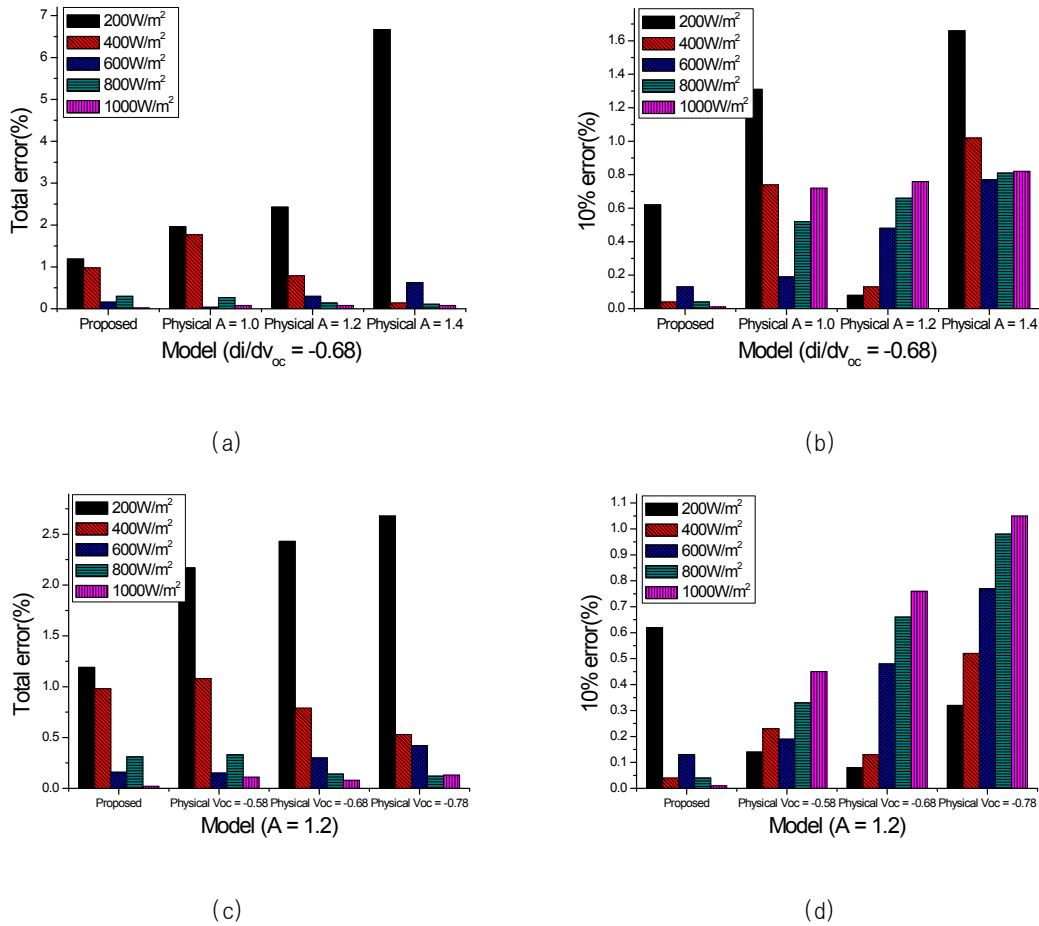


Fig. 11. Model accuracy under varying irradiation.

4.3 제안모델의 성능비교

제안모델과 PSIM 모델의 성능비교는 Fig. 9에 나타났다. 그림의 결과를 살펴보면 제안모델과 PSIM의 모델 모두 온도와 일사량의 변화에 대해서 잘 대응하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 더 정확한 비교를 위해서 식 (21)과 (22)을 이용하여 오차를 계산하였고 그 결과는 각각 Fig. 10과 11에 정리하였다. 여기서 온도와 일사량 변화의 기준은 패널의 데이터시트에 표시된 온도와 일사량의 변화를 사용하였으며, 제안모델과 PSIM의 모델의 P-V 출력특성에 대해서 각각 추출하였다. 그리고 PSIM 모델의 경우 사용자가 직접 입력하는 파라미터가 회로의 정확도에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해서 V_{oc} 에서의 기울기와 A값을 일정한 간격으로 변화를 주면서 결과를 추출하여 비교하였다.

그 결과를 살펴보면, 먼저 온도의 변화에 대응하는 각 모델의 결과는 Fig. 10과 같이 나타난다. 그림에서 (a)와 (b)는 V_{oc} 에서의 기울기를 고정한 뒤에 A를 0.2의 간격으로 변화 시키면서 얻은 그래프를 비교한 것이며, (c)와 (d)는 A를 1.2로 고정한 후에 V_{oc} 에서의 기울기를 0.1 간격으로 변화 시키면서 얻은 그래프를 비교한 것이다. 그림에서 제안방법은 온도에 따라서 변하는 내부의

파라미터를 잘 추종하여 온도변화에 관계없이 일정한 전체오차와 MPP부근의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 PSIM의 모델은 사용자가 입력해준 파라미터에 따라서 전체 및 MPP부근의 오차가 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 한 예로, V_{oc} 에서의 기울기를 -0.68, A를 1.0으로 선정하여 STC에서의 전체오차를 크게 줄일 수 있지만, 이 모델의 경우 온도가 변하면 오차가 크게 발생하며, MPP부근의 오차 또한 온도에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

다음으로 일사량의 변화에 대응하는 출력특성의 결과는 Fig. 11에 나타나있다. 그림은 추출된 그래프의 파라미터 조건은 온도변화에서의 조건과 동일하다. 그림에서 전체오차는 PSIM 모델과 제안모델이 비교적 비슷한 양상을 보이며, PSIM이 더 좋은 경우도 존재한다. 한 예로 PSIM 모델의 V_{oc} 에서의 기울기가 -0.68이고 A는 1.4인 경우 200W/m²을 제외한 부분은 제안모델 보다 더 좋은 성능을 제공한다. 하지만 MPP부근의 오차를 살펴보면, 200W/m²뿐만 아니라 나머지 일사량에서도 제안모델의 결과가 균등하고 작은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 제안모델은 PSIM의 물리적 모델과 다르게 사용자의 입력 파라미터에 영향을 받지 않고 데이터시트와

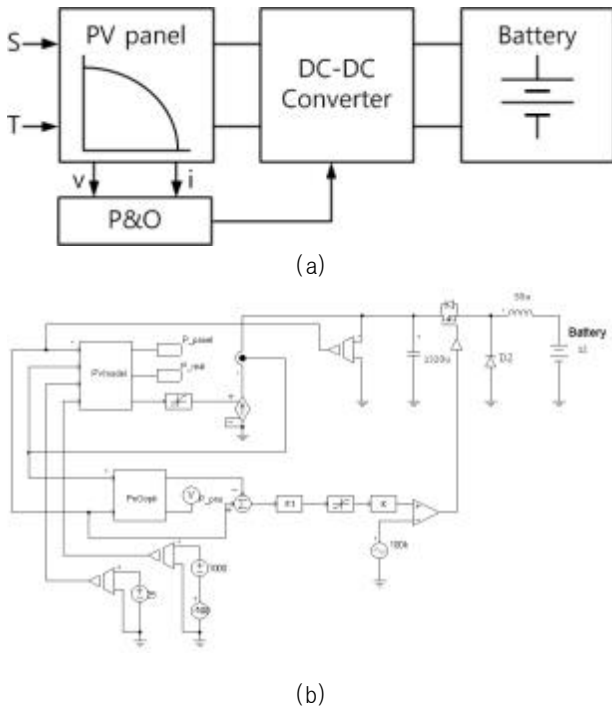


Fig. 12. Stand-alone PV system simulation.
(a) schematic (b) simulation circuit

TABLE IV
BUCK CONVERTER SPECIFICATION

Electrical specification	Value	Unit
Input voltage range	30-45	V
Maximum input current	4	A
Output power	120	W
Output voltage	12	V
Switching frequency	100	kHz
Inductor	55	uH

온도와 일사량 정보만으로 가변환경에 알맞게 내부 파라미터를 튜닝해서 우수한 성능의 태양광 패널의 등가 모델을 제공할 수 있음을 확인하였다.

5. 제안모델의 활용방안

태양광 패널의 등가모델은 주로 태양광 시스템의 개발을 위한 시뮬레이션 과정에서 사용이 되는데 이때 대부분의 태양광 모델은 MPPT와 함께 동작하게 된다. 결국 MPPT 알고리즘의 특성상 태양광 시스템의 시뮬레이션 과정에서 초기 과도상태를 제외한다면, 주로 MPP 부근의 정보만을 이용하게 되므로 MPP부근의 오차가 적은 제안모델이 매우 유용하게 사용될 수 있다.

제안모델이 MPPT시뮬레이션에도 사용될 수 있음을 보이기 위해서 제안모델과 Perturb and Observe (P&O)

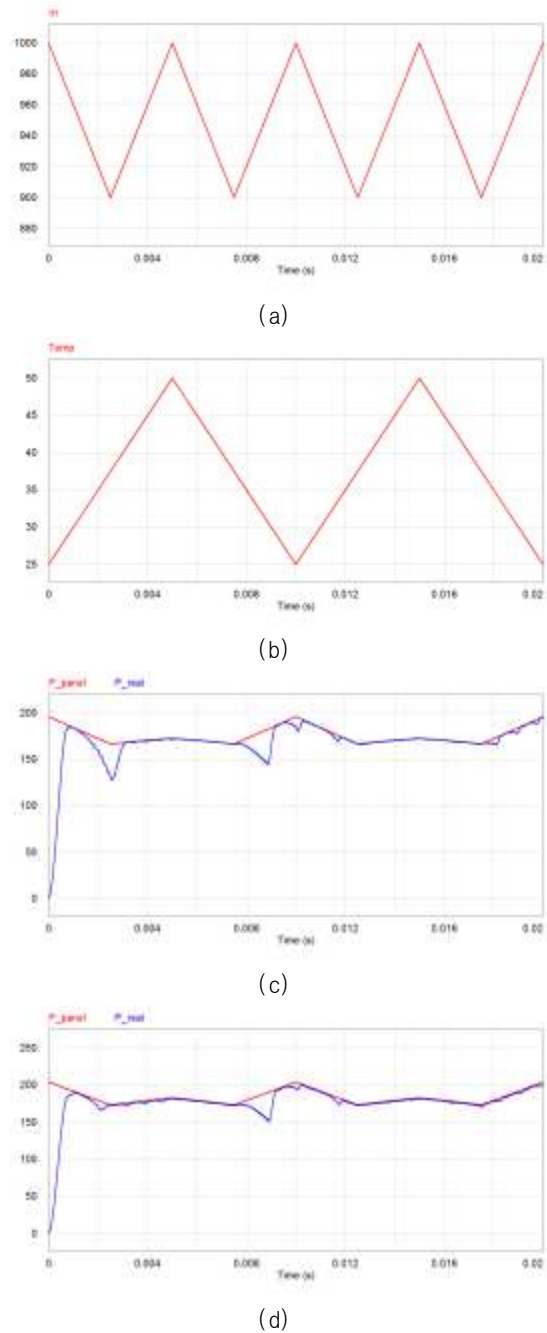


Fig. 13. PCS system simulation.
(a) irradiation (b) temperature
(c) physical model (d) proposed model

알고리즘으로 벡-컨버터를 이용하는 독립형 태양광 배터리 충전회로를 Fig. 12와 같이 구성하였다. Fig. 12(a)는 시스템의 구성도이며, 실제 시뮬레이션 회로는 (b)에 나타냈고 벡-컨버터의 하드웨어 스펙은 Table 4에 나타냈다. 이 회로를 통해서 제안모델을 이용한 독립형 태양광 시스템을 구성하였으며, 벡-컨버터의 동작특성이 포함된 시뮬레이션을 실행할 수 있다. 시뮬레이션의 환경 변화는 일사량은 900과 1000 W/m²사이에서 주기적으로 변화하도록 삼각파를 이용해서 설정하였고 일사량이 2주

기로 변할 때 온도는 25에서 50°C로 1주기로 변화도록 설정한 뒤 그 결과는 Fig. 13에 나타났다.

결과에서 P_{real} 은 P&O 알고리즘에 의해서 패널이 실제로 발생시키는 출력이며, P_{panel} 은 데이터시트로부터 예상할 수 있는 최대전력을 의미한다. 그리고 P_{real} 값이 P_{panel} 을 따라 최대전력지점을 추종하는 것을 확인할 수 있으며, 일시적으로 추종이 틀어지는 부분은 PSIM의 모델에서도 관찰할 수 있는 부분으로 P&O 알고리즘의 추종문제로 생각된다. Fig. 13의 결과는 제안 모델이 온도와 일사량에 따라서 변하는 조건에서도 시물레이션이 가능함을 보여준다. 그리고 time step = 0.1sec 이고 total time = 200sec의 시물레이션 조건하에서 PSIM모델의 총 시물레이션 시간은 1sec가 걸렸고 제안모델의 총 시물레이션 시간은 10sec의 시간이 소요되고 5msec/step의 시간이 걸림을 확인하였다.

결론적으로 제안모델의 최대전력지점 부근의 오차가 PSIM모델 보다 더 적은 것을 감안한다면 제안모델을 이용할 경우 시물레이션을 통해서 시스템의 효율을 예측할 때 성능의 저평가나 고평가 없이 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 생각한다. 결국 제안모델은 MPPT알고리즘의 평가 및 시물레이션의 성능평가에 유용하게 사용될 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 데이터시트만을 이용해서 온라인으로 실제 태양광 패널의 전기적 특성을 모사할 수 있는 PSIM 등가회로 모델을 제안하였다. 제안모델은 태양광 패널 제조사의 데이터시트 값만 알고 있으면 쉽고 빠르게 등가 모델을 얻을 수 있는 방법이며, 외부의 입력을 통해서 얻은 변하는 온도와 일사량에 대한 정보를 바탕으로 매 순간 파라미터 튜닝을 해주는 모델이다. 이는 사용자가 추가적으로 파라미터를 추출하기 위한 노력을 하지 않아도 되므로 사용이 쉽고 최적화 방법을 이용하여 정확도 및 속도가 향상된 모델을 제공할 수 있다. 이때, 최적화 방법은 파월 최적화 방법을 사용하였다.

제안모델의 타당성의 검증은 EN50530의 규격을 따라서 PSIM의 물리적 모델과 비교검증을 진행하였고 이때 실제 결정형 패널 KC200GT의 데이터 값을 이용해서 데이터를 추출하고 비교하였다. 결과를 살펴보면, 제안 방법은 온도와 일사량의 변화에 대응할 수 있음을 확인하였고 정확도 또한 기존의 PSIM 모델 보다 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이를 위해서 제안모델은 데이터시트 값만을 이용하였고 최종적으로 P&O 알고리즘과의 시물레이션을 통해서 태양광 시스템의 시물레이션 또한 가능함을 보였다. 향후 과제로는 PSIM의 시물레이션 속도를 더욱 향상시키기 위해서 미분식을 사용하는 최속강하법 (steepest descent method), 공액구배법 (conjugate gradient method) 등의 최적화 방법을 적용할 예정이다.

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. NRF-2014R1A1A2059772)

References

- [1] J. Cubas, S. Pindado, and M. Victoria, "On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior," *Journal of Power Source*, Vol. 247, pp. 467-474, Feb. 2014.
- [2] PSIM User's Guide, Ver. 9, POWERSIM, May 2010.
- [3] A. K. Singhal and R. Narvey, "PSIM and MATLAB based simulation of PV array for enhance the performance by using MPPT algorithm," *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 5, pp. 511-520, Jul. 2011.
- [4] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, "Improved and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, Vol. 80, Issue 1, pp. 78-88, Jan. 2007.
- [5] J. J. Soon and K. S. Low, "Photovoltaic model identification using particle swarm optimization with inverse barrier constraint," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 9, pp. 3975-3983, Sep. 2012.
- [6] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, "Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement method, difficulties, and results," *IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1183-1186, Sep. 30-Oct. 3, 1997.
- [7] A. N. Celik and N. Acikgoz, "Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models," *Applied Energy*, Vol. 84, Issue 1, pp. 1-5, Jan. 2007.
- [8] J. Y. Park and S. J. Choi, "A novel datasheet-based parameter extraction method for a single-diode photovoltaic array model," *Solar Energy*, Vol. 122, pp. 1235-1244, Dec. 2015.
- [9] J. Crispim, M. Carreira, and R. Castro, "Validation of photovoltaic electrical models against manufacturer's data and experimental results," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Apr. 12-14, 2007.
- [10] 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, Issue 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [11] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2007)*, pp.

2392-2396, Jun. 2007.

- [12] J. Y. Park and S. J. Choi, "Datasheet-based circuit parameter extraction method for maximum power point simulation of photovoltaic array," *ICPE 2015-ECCE Asia*, pp. 1413-1419, Jun. 2015.
- [13] P. Venkataraman, *Applied Optimization with MATLAB Programming*, 2nd ed., WILEY, 2009.
- [14] S. S. Raghuvanshi, A. Singh, and Y. Mokhariwale, "A comparison & performance of simulation tools MATLAB/SIMULINK, PSIM & PSPICE for power electronics circuit," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 2, Issue 3, pp. 187-191, Mar. 2012.
- [15] IEC EN50530, Standard for Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters, CENELEC, Stassart 35, B-1050 Brussels.



박준영(朴濬永)

1989년 9월 19일생. 2014년 울산대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



최성진(崔城振)

1973년 2월 4일생. 1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부(공박). 2008년~2011년 삼성전자 영상디스플레이 사업부 책임 및 수석연구원. 2011년~현재 울산대 전기공학부 조교수.