

개선된 입자 무리 최적화 알고리즘 이용한 태양광 패널의 최대 전력점 추적

Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

김재정 · 김창복*

가천대학교 에너지 IT학과

Jae-Jung Kim · Chang-Bok Kim*

Department of Energy IT, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea

[요 약]

본 연구는 입자 무리 최적화 (PSO; particle swarm optimization) 알고리즘을 이용하여 기존의 MPPT 알고리즘보다 신속하게 MPP를 추적할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안 모델은 PSO 알고리즘에서 gbest 및 pbest의 가속 상수를 높게 설정하여 신속하게 MPP 지점을 추적하고 이로 인한 전력 불안정 문제점을 제거하였다. 또한, 일사량의 급격한 변화에 따른 태양광 패널의 전력 변화를 감지하여 알고리즘을 다시 실행하였다. 실험결과, 일사량이 691.5W/m²에 대해서 MPPT 시간이 0.03초와 전력이 131.65로서 기존의 P&O와 INC 알고리즘보다 높은 전력과 빠른 속도로 MPP를 추적하였으며, 일사량 변화에 따라 신속하게 MPP를 추적하였다. 제안 모델은 태양광 패널이 병렬로 연결되어 있는 태양광 발전소에서 부분적인 음영에 의해 전력량의 변화를 감지하였을 경우에도 적용할 수 있다. 본 연구는 MPPT 알고리즘을 개선하기 위해 MFO (moth flame optimization) 및 WOA (whale optimization algorithm)와 같은 최적화 알고리즘에 대한 비교 연구가 필요하다.

[Abstract]

This study proposed a model that can track MPP faster than the existing MPPT algorithm using the particle swarm optimization algorithm (PSO). The proposed model highly sets the acceleration constants of gbest and pbest in the PSO algorithm to quickly track the MPP point and eliminates the power instability problem. In addition, this algorithm was re-executed by detecting the change in power of the solar panel according to the rapid change in solar radiation. As a result of the experiment, MPP time was 0.03 seconds and power was 131.65 for 691.5 W/m², and MPP was tracked at higher power and speed than the existing P&O and INC algorithms. The proposed model can be applied when a change in the amount of power is detected by partial shading in a Photovoltaic power plant with Photovoltaic connected in parallel. In order to improve the MPPT algorithm, this study needs a comparative study on optimization algorithms such as moth flame optimization (MFO) and whale optimization algorithm (WOA).

Key word : Photovoltaic, Maximum power point tracking, Perturbation and observation, Incremental conductance, Particle swarm optimization.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.4.291>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 1 July 2020; Revised 23 July 2020

Accepted (Publication) 17 August 2020 (30 August 2020)

*Corresponding Author : Chang-Bok Kim

Tel : +82-10-8908-3946

E-mail : cbkim@gachon.ac.kr

I. 서 론

화석 연료는 지구 온난화에 많은 영향을 끼치며 유한한 자원을 지니고 있다. 이에 비해 신재생 에너지는 환경 친화적이며 무한한 자원을 지니고 있다. 특히 태양광 에너지는 태양광으로 전력을 생산하며, 태양광만 있으면 에너지를 지역에 상관없이 균등하게 생산할 수 있다. 이러한 장점으로 각국에서는 신재생 에너지 중 태양광 발전 시스템에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 태양광 발전소를 증설하고 있다. 최근 태양광 발전은 전력이 필요한 사물에 자체적으로 태양광 패널을 이용한 전력 공급을 시도하고 있다. 특히, 화석 연료를 주로 사용하는 자동차, 선박, 비행기 등 운송수단에 태양광 에너지를 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

태양광 발전은 태양광 패널에 태양광이 입사되면 광 에너지가 전기에너지로 변환되어 전기적인 출력이 발생한다. 태양광 패널은 개방전압과 단락전류 사이의 전압 및 전류 특성을 가진다. 최대 전압과 전류를 나타내는 개방전압과 단락전류 사이에 최대 전력을 나타내는 MPP (maximum power point)가 있다. 태양광 패널은 기상요소에 따라 민감하게 전압과 전류가 바뀌는 불안정한 전력 공급 장치로서 기존의 발전방식들과 비교해서 안정적인 전력을 출력하기가 기술적으로 쉽지 않다. 따라서 태양광 발전 시스템은 외부변화에 대해서 안정적이고 효율적인 최대 전력을 출력하기 위해서는 최대 전력 점을 추적하기 위한 MPPT (maximum power point tracking) 알고리즘이 필요하다 [1],[2].

MPPT 알고리즘은 P&O(perturbation and observation), InC(Incremental conductance), 유전 알고리즘, 인공지능 등이 있다[3]-[6]. P&O와 InC 알고리즘은 설정된 전압 변화 폭이 클 경우 출력전압에 큰 진동의 발생하기 때문에 정상상태에서 오차가 크게 발생하고, 작을 경우에는 추적시간이 늦어지는 단점이 있다. 최근 최적화 알고리즘에 대한 연구가 지속적으로 이루어지면서, 최적화 알고리즘을 MPPT에 응용하고자 하는 연구가 진행되고 있다[7]-[9].

본 연구는 입자 무리 최적 화(PSO; particle swarm optimization) 알고리즘을 이용하여, 기존의 MPPT 알고리즘보다 신속하게 MPP를 추적할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안 알고리즘은 PSO 알고리즘에서 gbest (generation best)와 pbest (particle best)의 가속 상수 값을 높게 설정하여 신속하게 MPP 유사 지점을 추적하고, 이로 인한 전력 불안정 문제점을 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구는 MATLAB과 Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

본 논문은 2장에서 관련연구로서 P&O, InC, 최적화 등에 대한 알고리즘을 서술하였으며, 3장에서 MPPT 모델을 제안하였다. 또한, 4장에서 구현된 모델의 실험 결과 및 비교 분석을 하였으며, 마지막으로 결론에 대해서 서술하였다.

II. 태양광 패널 및 MPPT 알고리즘

2-1 태양광 패널

태양광 패널은 p-n 접합으로 이루어지며 빛이 입사될 때 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 즉, p-n 접합에 빛에 의하여 전자-정공이 발생하며 전자와 정공의 이동에 의해 열평형 상태에 비해 캐리어 농도가 상승하여 p형 반도체와 n형 반도체 사이의 농도 차이에 따라 기전력이 발생하는 효과이다. 그림 1은 태양광 패널의 등가회로이다. 여기서 $R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$ 인 이상적인 등가회로에서 부하에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{q(V+IR_s)/\eta K_B T} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

식 (1)에서 태양광 패널의 출력특성을 구할 수 있다. 여기서 V 는 태양전지의 출력전압, I 는 태양전지의 출력전류, I_{ph} 는 태양전지의 광전류, I_r 는 태양전지의 역 포화전류, q 는 전하량, η 는 접합 패널의 품질인수, K_B 는 볼츠만 상수 [J/K], T 는 온도 [°K], R_s 는 태양전지의 내부 직렬저항, R_{sh} 는 태양전지의 내부 병렬저항이다. 그림 2는 태양광 패널의 출력 특성을 나타냈다. 그림 3은 일사량을 400 W/m²에서 1,000 W/m²까지 200 W/m²씩 증가시켰을 때 일사량에 따른 태양전지의 출력특성을 나타냈다[7]. 그림 4는 25°C에서 85 °C까지 20 °C씩 증가하였을 때 온도 변화에 따른 태양전지의 출력특성을 나타냈다.

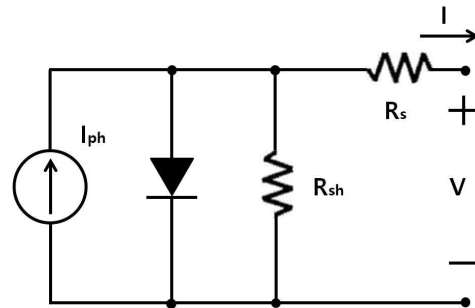


그림 1. 태양광 패널의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of PV

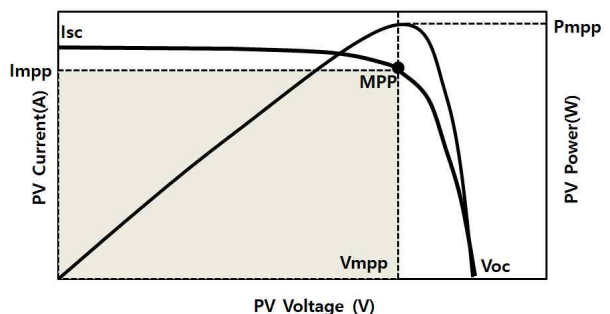


그림 2. 태양광 패널의 출력특성
Fig. 2. Output characteristics of PV

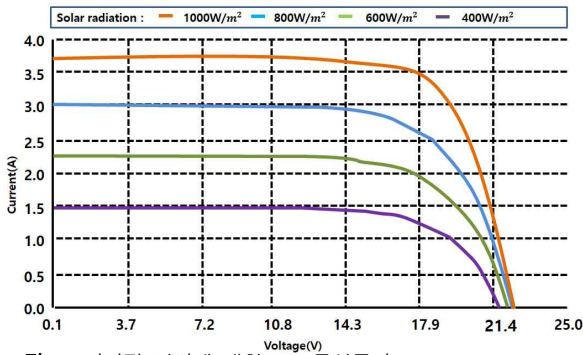


그림 3. 일사량 변화에 대한 I-V 특성곡선
Fig. 3. I-V characteristic curve with radiation changing

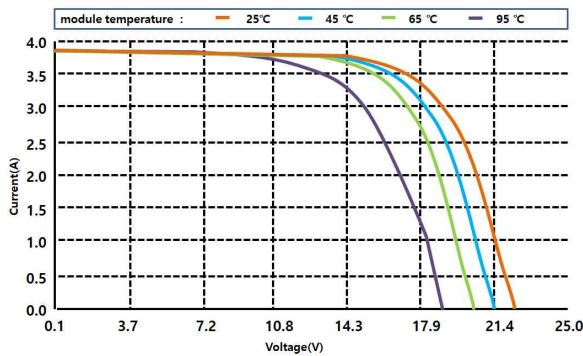


그림 4. 온도 변화에 따른 I-V 특성 곡선
Fig. 4. I-V characteristic curve with temperature changing

그림 3에서 일사량의 변화 시 태양전지의 개방전압은 큰 변화가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림4에서 일사량이 변화한 경우에 비해 온도가 변화한 경우에는 전류의 변화보다 전압 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 태양전지의 출력은 일사량과 온도에 의해서 영향을 받는다.

2-2 P&O와 INC 알고리즘

P&O 알고리즘은 간단한 피드백 구조를 가지며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. P&O 알고리즘은 전력의 증감률에 의해서 작동하는 방식으로 전압이 한 방향으로 이동하고 그에 따라 전력이 증가하면 같은 방향으로 동작 점을 이동시키고, 전력이 감소하면 반대방향으로 동작 점을 이동시킨다. 즉, 한번 전압의 변화에 따른 방향이 결정되면 빠른 응답과 정상상태에서의 변동을 고려하여 설정된 일정한 비율로 동작 점이 이동하게 된다. 다음은 P&O 알고리즘에 대해서 나타냈다 [11],[12].

$P(k)$ 는 현재전력을 나타내며 $P(k-1)$ 은 과거전력을 나타낸다. $V(k)$ 는 현재전압을 나타내고 $V(k-1)$ 은 과거전압을 나타낸다. ΔV 는 전압 증기분을 나타낸다.

```

Sensing V(k), I(k)
if (P(k) - P(k-1)) = 0 :
    if (P(k) - P(k-1)) > 0 :
        if (V(k) - V(k-1)) > 0 :
            Vref = Vref + ΔV
        else
            Vref = Vref - ΔV
    else
        if (V(k) - V(k-1)) > 0 :
            Vref = Vref - ΔV
        else
            Vref = Vref + ΔV
return
    
```

전력이 증가하면 다음 주기 동안 ΔV 는 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 ΔV 의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 의미한다. 그러므로 MPP 지점에서 ΔV 에 의해 진동 할 것이며, 그 결과 PV에서 손실이 발생하게 된다. P&O 알고리즘은 MPP에 도달하기 위한 매우 우수한 방식으로 태양전지의 특성에 독립적이나, 단점은 정상상태에서의 출력 전력의 미소 진동이 존재하며 출력 전력의 손실이 있다[11].

INC 알고리즘은 PV의 V-P 출력곡선의 기울기를 이용하는 방식으로 그 특성이 안정적이고 구현방법이 간단하다. 즉, MPP에서 V-P 특성곡선의 기울기가 0라는 것을 이용하여 기울기의 크기와 부호에 따라 MPP를 찾는 방식이다. 그림 5에 INC 제어 원리에 대해서 나타냈다[12],[13].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} > 0 \text{ (point A)} \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} < 0 \text{ (point B)} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \text{ (point C)} \quad (4)$$

식 2는 V-P 특성곡선의 기울기가 양수로서 MPP의 좌측 지점이고, 식 3은 음수로서 MPP의 우측지점을 나타내며, 식 4는 기울기가 0으로 MPP 지점이다.

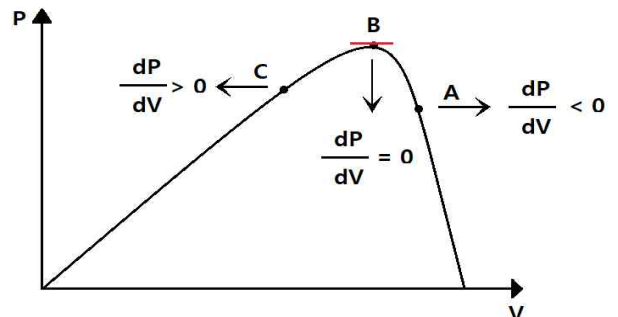


그림 5. INC의 제어 원리
Fig. 5. Control theory of INC

InC는 P&O의 단점을 보완하기 위한 알고리즘으로 태양전지의 출력전압이 항상 MPP 전압에 추종하도록 하여 MPP 추적 제어에 벗어나지 않는 장점이 있다. 그러나 많은 연산이 필요하고, 급격한 일사량의 변화에 대해서 MPPT를 실패할 확률이 높다. 다음은 InC 알고리즘에 대해 나타냈다[13],[14].

```

Sensing V(k), I(k)
if (V(k) - V(k-1)) > 0 :
    if(I(k) - I(k-1)) = 0 ;
        return
    else :
        if (I(k) - I(k-1)) > 0 :
            Vref = Vref + ΔV
        else :
            Vref = Vref - ΔV
    else :
        if dI/dV > -I/V :
            Vref = Vref + ΔV
        else
            Vref = Vref + ΔV
return
    
```

V(k)는 현재 전압을 나타내고 V(k-1)은 이전 전압을 나타낸다. I(k)는 현재 전류를 나타내고 I(k-1)은 이전 전류를 나타낸다. dI와 dV는 각각 PV 전류와 PV 전압의 변화량이다. ΔV는 전압 증가분을 나타낸다. INC 알고리즘은 P&O 방식과 함께 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방법 중 하나이다.

2-3 PSO 알고리즘

PSO알고리즘은 군집기반의 진화 연산 기법으로 다차원의 탐색공간에서 최적의 해를 검색하는 알고리즘으로 새나 물고기 무리의 움직임에 관한 연구로부터 유도되었다. 즉, 무리가 먹이를 찾아가는 과정에서 무리 내부의 각 개체가 지금까지의 자신의 경험이 무리 전체에 공유되어 있는 정보를 기초로 하여 행동한다는 개념이다.

pbest는 각 객체가 세대를 거듭하는 동안 지나온 지점에서 가장 좋은 적합도 값을 가진 위치벡터로서 다음과 같이 나타낸다.

$$x_i = x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$$

$$pbest = bestfit(x_i^k) \tag{5}$$

여기서 x_i 는 각 개체의 위치 벡터이며, k 는 세대이다. 또한 gbest는 모든 개체들의 pbest 에서 최적의 적합도 값을 가지고 있는 위치벡터이다. gbest는 다음과 같이 나타낸다.

$$gbest = \max(pbest_1, pbest_2, \dots, pbest_n) \tag{6}$$

여기서 n 는 개체의 수이다. PSO 알고리즘은 다음과 같다

1 단계 : 개체를 탐색 공간 내에서 임의로 생성한다. 이 개체들을 pbest로 설정하고 이들이 초기 군집을 구성한다. 각 개체의 속도 벡터와 위치 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i = v^{\min} + \frac{v^{\max} - v^{\min}}{20} rand() \tag{7}$$

$$x_i = x^{\min} + \frac{x^{\max} - x^{\min}}{20} rand()$$

v^{\min} 와 v^{\max} 는 최대 및 최소 제한 속도이며, x^{\min} 과 x^{\max} 는 최대 및 최소 위치 경계이다.

2 단계 : 생성된 개체들은 적합도 함수(fitness function) 식을 이용하여 평가된다.

$$F(x_i^k) = fit(x_i^k) \tag{8}$$

각 세대에서 개체의 적합도 값들은 이전 세대의 각 개체의 적합도 값과 비교하여 이전 세대 값보다 좋으면 pbest로 권장하며, 전체 군집의 pbest중 가장 좋은 적합도 값을 가진 개체는 gbest로 권장한다. 본 논문에서 적합도 함수는 전력이다.

3 단계 : 모든 개체들에 대해 새로운 속도로 업데이트한다. 다음 세대의 속도는 다음과 같다.

$$v_i^{k+1} = w(k)v_i^k$$

$$v_i^{k+1} = v_i^{k+1} + c_1rand()(pbest_i^k - x_i^k)$$

$$v_i^{k+1} = v_i^{k+1} + c_2rand()(gbest_i^k - x_i^k)$$

$$v_i^k = \begin{cases} v^{\min}, & \text{if } v_i^{k+1} > v^{\max} \\ v_i^{k+1}, & \text{if } v^{\min} \leq v_i^{k+1} \leq v^{\max} \\ v^{\min}, & \text{if } v_i^{k+1} < v^{\min} \end{cases} \tag{9}$$

여기서 c_1 과 c_2 는 가속 상수 (acceleration constant)이며, $w(k)$ 는 관성 하중 (inertia weight)이다. 여기서 속도가 최대 속도나 최소 속도를 벗어나면 최대 또는 최소 속도로 지정한다.

4 단계 : 3단계에서 구해진 속도를 가지 새로운 개체들의 위치 벡터를 구한다.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{10}$$

$$v_i^k = \begin{cases} x^{\min}, & \text{if } x_i^{k+1} > x^{\max} \\ x_i^{k+1}, & \text{if } x^{\min} \leq x_i^{k+1} \leq x^{\max} \\ x^{\min}, & \text{if } x_i^{k+1} < x^{\min} \end{cases}$$

위치는 속도와 마찬가지로 위치가 최대 위치나 최소 위치를 벗어나면 최대 또는 최소 위치로 지정하게 된다. 본 논문에서 위치는 컨버터 스위치의 듀티 사이클이다.

5 단계 : 최대 세대에 도달하거나, 적합도 조건이 만족할 때 알고리즘을 종료하며, 조건에 만족하지 않을 때는 2 단계부터 반복한다.

PSO 알고리즘의 종료 후 탐색 공간상의 최적 위치는 마지막 세대에 생성된 g_{best} 가 된다.

III. 제안 MPPT 모델

본 연구는 PSO 알고리즘을 이용하여 기존의 MPPT 알고리즘보다 신속한 MPPT 모델을 제안하였다. 시뮬레이션 전체 구성은 태양광 패널과 승압 컨버터인 부스트 컨버터, 그리고 MPPT 알고리즘으로 구성되어 있다. 태양광 패널의 출력은 전력이며, PSO 알고리즘에서 입자의 속도는 시스템의 전압 증가이고, 입자의 위치는 부스트 컨버터의 스위치에 대한 듀티 사이클이다. PSO 알고리즘의 MPPT는 승압 컨버터의 스위치를 PWM으로 듀티 사이클을 제어함으로써 전력을 제어하는 것이다. 그림 6에 MPPT 시뮬레이션 모델에 대해서 나타냈다.

PSO 알고리즘의 가속상수 c_1 과 c_2 는 각 개체의 최적 위치인 p_{best} 및 전체 무리의 최적 위치인 g_{best} 중에서 어떤 위치정보에 가중치를 부여할지를 결정한다. 또한, 관성 하중 $w(k)$ 는 군집의 최종 수렴을 위한 제어 파라미터로서, 값이 클 경우에는 전역 탐색이 강화되지만 지역 극소에 빠지기 쉽다. 반대로 값이 작을 경우에는 지역 탐색이 강화되지만 속도가 느려지게 되는 문제가 발생한다. 수식 (9)와 (10)에서 듀티 사이클이 갱신될 경우, 가속상수 c_1, c_2 는 각각 p_{best} 와 g_{best} 의 가중치로 증가하면 MPPT의 속도는 빨라질 수 있으나 실제 MPPT의 정확도는 떨어져 최대 전력을 출력하지 못한다.

본 연구에서는 p_{best} 와 g_{best} 를 위한 가속 상수를 0.4로 하였으며, 관성 하중은 0.9로 하였다. 또한, 트레이드 오프를 찾기 위해 3 개의 입자가 고려하였으며, 듀티 사이클은 [0.1,0.9] 간격을 벗어나는 값을 수용 할 수 없으므로 입자는 이 한계 내에서 수렴하게 하였다. 표 1에 본 연구에서 사용한 Kyocera KC200GT 패널 사양에 대해서 나타냈다.

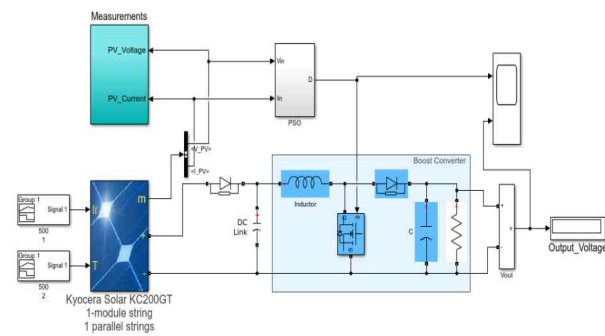


그림 6. MPPT 시뮬레이션 모델
Fig. 6. MPPT simulation model

표 1. Kyocera KC200GT패널 사양
Table 1. Kyocera KC200GT Panel Specifications

Parameter	Value
Maximum Power (Pmax) at STC	200W(+10%/-5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	-1.23*10 ⁻³ V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18*10 ⁻³ A/°C

표 2. 가중치 계수에 대한 결과

Table 2. Results for weighting coefficient

acceleration constant		MPPT time	Voltage	Current	Power
c_1	c_2				
0.4	0.4	0.048	24.14	5.42	131.6
0.5	0.5	0.036	25.96	4.972	129.1
0.6	0.6	0.03	26.59	4.679	124.4

표 1의 사양은 태양광 패널의 기술적인 수치를 판단하는 STC(standard test condition)에서 자외선 1000 W/m²과 온도 25°C에서의 값들이다. 표 2에 각 가속상수에 대한 MPP 추적 시간, 전압, 전류, 전력에 대해서 나타냈다. 가속상수 c_1, c_2 가 0.4인 경우 MPP 추적 시간은 0.048초이고 0.5인 경우 0.036초, 그리고 0.06인 경우 0.03초이다. 또한, MPP의 전압인 V_{mpp} 는 24.14 V에서 26.59 V로 증가함을 알 수 있다. 그림 7에 가속상수 값에 대한 결과를 나타냈다.

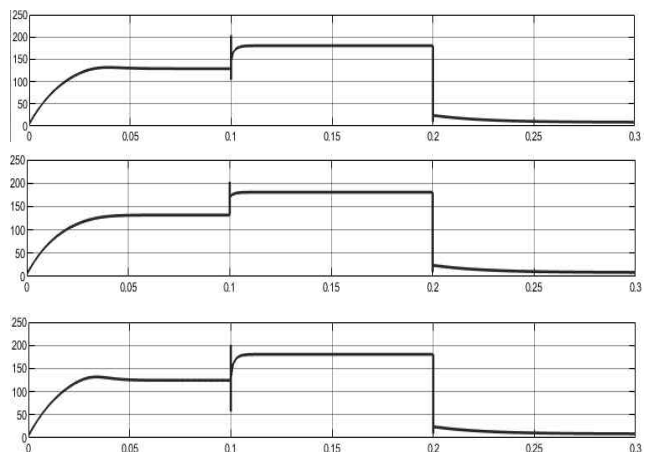


그림 7. 가속상수에 대한 결과
Fig. 7. Results for acceleration constant

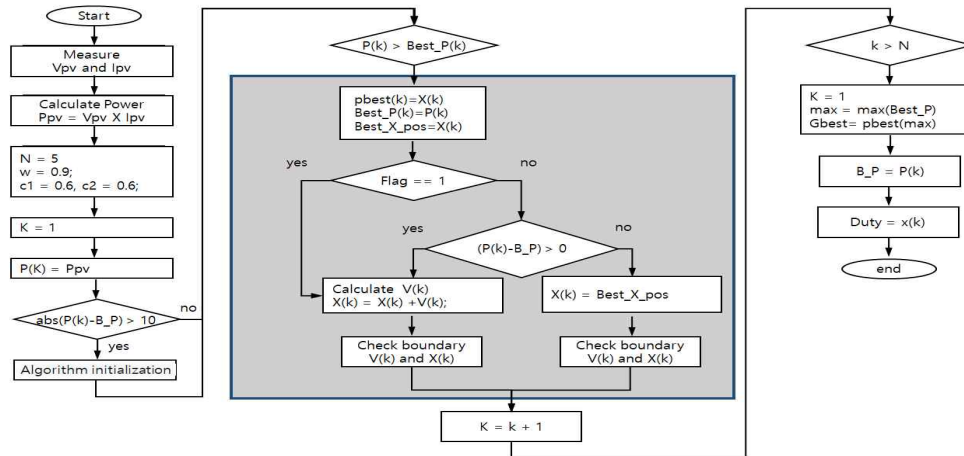


그림 8. 전체 흐름도
Fig. 8. Overall flowchart

그림 7에서 MPPT 시간은 빠르지만 전력이 MPP 이후 불안정하게 감소됨을 볼 수 있다. 이것은 태양광 패널의 I-V 특성에 의해 MPP 지점에서 전압이 일정 기준 이상으로 증가하게 되면 전류는 급속도로 감소하기 때문이다. 따라서 V_{mpp} 를 26.59 V 일 경우, MPP의 전류인 I_{mpp} 는 4.67 9A로 감소하게 된다. 결과적으로, MPP의 전력인 P_{mpp} 는 131.6 W에서 124.4W로 6% 감소된 전력을 발생시킨다. 이와 같이 가속상수 값을 증가시키게 되면 g_{best} 와 p_{best} 의 적응 속도가 높아지므로 MPP 추적시간이 빨라지지만 최적의 전력을 찾아내기 어려운 문제점이 발생한다. 본 논문은 출력전압을 MPP와 동일하게 하기 위하여 부스터 컨버터의 출력 특성을 이용하였다. 다음은 부스터 컨버터의 입출력 전압과 듀티 사이클과의 관계를 나타낸다.

$$V_{OUT} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \tag{11}$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{OUT}}$$

입력전압은 현재 패널의 전압을 사용하며 출력전압의 경우 메모리에 저장되어 있던 가장 높은 출력전력을 현재의 전류로 나누어 구한다. 이것은 V_{mpp} 이며, 식(11)을 이용하여 듀티 사이클을 구할 수 있으며, 변경된 듀티 사이클에 대해 속도를 갱신한다. 다음은 이러한 알고리즘을 나타냈다. 또한 일사량의 감소로 인한 전력이 저하 시에는 일반적인 PSO 알고리즘을 실행하기 위해 Flag 변수를 사용한다.

```

if (Power(k) - Before_Power) < 0
    [P,b]=max(Best_Power);
    X(k) = 1 - (Vin/(P/Iin));
    V(k) = w * V(k);
    V(k) = V(k) + c1 * (pbest(k) - X(k));
    V(k) = V(k) + c2 * (gbest - X(k));
end
    
```

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{10^6} \tag{12}$$

본 연구에서는 관성 하중 값을 다음과 같이 개선하였다. 이것은 초기에는 전역 탐색이 강화하고, 시간이 진행될수록 지역 탐색이 강화하기 위한 것이며, MPPT 속도를 보다 빠르게 하기 위함이다. 또한, 일사량 변화에 의해 PV시스템의 전력 변화가 있을 경우 새로운 글로벌 MPP를 추적하기 위해 다음과 같은 조건으로 알고리즘이 다시 실행하였다.

$$\text{ifabs}(\text{power} - \text{Before power} - \geq 10 \quad \text{restart} \tag{13}$$

IV. 결과 및 비교 분석

실험은 윈도우 10 환경에 Matlab 2019a 버전을 이용하여 구성하였고, 입력데이터는 Simulink의 Signal Builder를 사용하였다. 일사량은 0-0.1초 구간에는 690 W/m², 0.1-0.2초 구간에는 1030 W/m², 0.2-0.3초 구간에는 130 W/m²로 변화를 주었다. 또한, 온도는 동일한 구간에 40 °C, 50 °C, 30 °C로 변화를 주었다. 표 3에 각 알고리즘에 대한 파라미터를 나타냈다.

표 3. 각 알고리즘의 파라미터

Table 3. Parameters of each algorithm

Algorithm	Parameter	Initial Position
P&O	$\Delta D = 0.02$	1.0
INC	$\Delta D = 0.02$	1.0
Existing PSO	$N = 3, w = 0.9$ $c_1 = 0.4, c_2 = 0.4$	0.1, 0.5, 0.9
Improved PSO	$N = 3, w = 0.9$ $c_1 = 0.6, c_2 = 0.6$	0.1, 0.5, 0.9

P&O와 INC는 초기 듀티 사이클을 1.0으로 시작하였으며, 듀티 사이클의 변화량을 $\Delta D = 0.02$ 로 하였다. PSO는 입자를 3개로 관성 하중을 0.9 그리고 가속상수를 0.4로 동일하게 하였다. 또한, 개선된 PSO는 입자를 3개 관성합수를 0.9로 하여 반복할수록 관성 하중 값을 감소하였으며, 가속상수를 0.6으로 하였다.

그림 9는 일사량과 온도는 691.5 W/m^2 , 38.9°C 일 경우 0.0-0.1초 사이의 태양광 패널의 전압, 전류, 전력 그래프를 나타냈다. 그림에서 기존 알고리즘으로 가속상수를 증가했을 경우 전류가 패널의 전류-전압 특성에 따라 전류가 감소되면서 전력이 미세하게 감소했음을 알 수 있다. 그러나 개선된 알고리즘으로 가속상수를 증가시킨 상태에서 최적의 듀티 사이클을 찾아서 복원했을 경우 전류의 감소 문제가 해결되면서 전력의 감소되는 문제점을 해결할 수 있었다. 표 4에 각 알고리즘을 비교했다.

P&O 알고리즘은 MPP 추적시간이 0.0536초, INC는 0.065초이다. 또한, 기존 PSO의 MPP 추적 시간은 0.48초 이고 개선된 PSO 알고리즘은 0.03초이다. 각 알고리즘의 MPP 추적 시간은 기존 알고리즘 보다 PSO 알고리즘이 보다 신속했다. 또한 기존 PSO 보다 개선된 PSO 알고리즘의 추적시간이 신속했다.

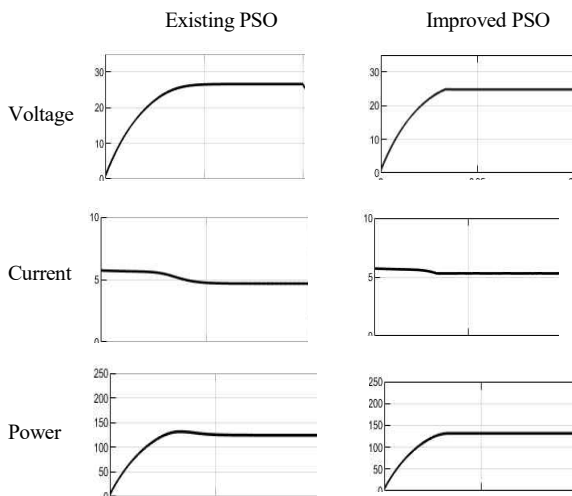


그림 9. 기존 PSO와 개선된 PSO 결과
Fig. 9. Results for existing PSO and Improved PSO

표 4. 각 알고리즘의 비교
Table 4. Comparison of each algorithm

Algorithm	Power	Tracking time
P&O	128.4 -131.1	0.0536
INC	128.3	0.065
Existing PSO	131.65	0.048
Improved PSO	131.65	0.03

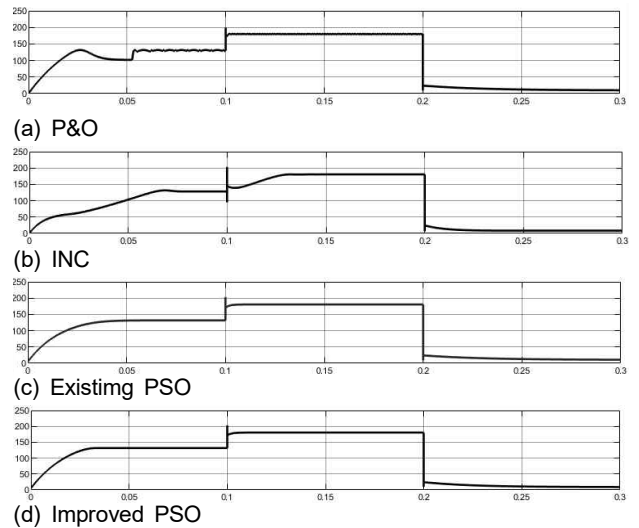


그림 10. 실험결과
Fig. 10. Experimental results

이것은 제안 알고리즘이 전력이 감소하는 위치를 파악하여 최적의 MPP를 찾도록 듀티 사이클을 조정하였기 때문이다. 이에 의해 전압은 해당 환경의 V_{mppt} 인 24.8 V를 탐색하고 이에 따라 태양광 패널의 I-V특성에 의해 I_{mp} 를 탐색하여 최종적으로 MPP를 찾아냈다. 이것은 131.65 W로 기존의 PSO와 동일한 성능을 보이고 MPP 추적시간은 0.03으로 감소하였다.

그림 10에 실험 결과에 대한 전력 그래프를 나타냈다. 그림에서 기존 알고리즘에 비해서 PSO알고리즘이 보다 신속하게 MPP를 추적함을 알 수 있다. 또한, 급격한 태양광 패널의 전력량 변화에 대해서 MPPT를 다시 실행함으로써 일사량 변화에 대해서 신속하게 MPP를 추적할 수 있다. 이것은 일사량 변화 뿐 아니라 태양광 패널이 병렬로 연결되어 있는 태양광 발전소에서 부분적인 음영에 의해 전력량의 변화를 감지하였을 경우에도 적용할 수 있다.

V. 결론

본 연구는 기존의 알고리즘보다 신속하게 MPP를 추적할 수 있는 개선된 PSO 알고리즘 모델을 제안하였다. 제안 알고리즘은 전력이 증가하다가 감소하는 위치가 MPP 지점인 것을 감안하여 PSO 알고리즘의 가중치 계수를 크게 하면 보다 빠르게 유사지점을 추적하는 것을 이용하였다. 이에 의해 전압은 해당 환경의 V_{mp} 를 탐색하고 이에 따라 태양광 패널의 I-V특성에 의해 I_{mp} 를 탐색하여 최종적으로 MPP를 탐색하였다. 제안 알고리즘은 전력은 기존의 PSO와 동일한 성능을 보이고 MPPT시간은 0.03으로 감소하였다. 또한, 실험을 통해 다양한 일사량과 온도의 조합에 대해서 기존 알고리즘에 비해 보다 높은 전력과 빠른 속도로 MPP를 추적함을 증명하였다. 제안 알고리즘은 일사량, 온도 등 기상요소 변화 뿐 아니라 패널의 그림자 요소 등 외부 환경 변화에 신속하게 MPP를 추적 가능하다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20194030202290)

References

[1] S. K. Ock and O. Yang, "A study on the new MPPT control method for grid-connected PV generation system," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 28-3, Feb. 2012.

[2] J. K. Min and W. S. Choi, "Analysis of power generation characteristics according to the MPPT algorithm period," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 67, No. 4, pp. 233-237, Dec. 2018.

[3] C. I. William, and R. Ramesh. "Comparative study of P&O and InC MPPT algorithms," *American Journal of Engineering Research*, Vol 2, No. pp. 402-408, 2013.

[4] S. H. Moon, J. W. Kim, B. G. Park, and J. M. Kim, "Maximum power control of tidal current generation system using P&O algorithm," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 22, No. 3, pp. 199-206, Jun. 2017.

[5] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, 2008.

[6] J. J. Khanam and S. Y. Foo, "Modeling of a photovoltaic array in MATLAB simulink and maximum power point tracking using neural network," *Journal of Electrical & Electronic Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 40-46, July. 2018.

[7] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, "An improved particle swarm optimization(PSO)-based MPPT

for PV with reduced steady-state oscillation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 8, pp. 3627-3638. 2012.

[8] K. Ishaque and Z. Salam, "A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, pp. 3195-3206, 2013.

[9] J. Y. Shi, D. Y. Zhang, F. Xue, Y. J. Li, W. Qiao, W. Yang, Y. M. Xu, and T. Yang, "Moth-flame optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partial shading conditions," *Journal of Power Electronics*, Vol.19 No.5, pp. 1248-1258, 2019.

[10] J. S. Ko and D. H. Chung, "MPPT control of PV system using improved PO method," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 12, pp. 1649 - 1654, 2014.

[11] B. S. Kim, J. J. King, W. S. Sim, J. M. Jo, and H. J. Cha, "A study on high-efficiency MPPT algorithm based on P&O method with variable step size," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8, Feb. 2019.

[12] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, July 2005.

[13] S. R. Chafle and U. B. Vaidya, "Incremental conductance MPPT technique for PV system," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 2, Issue 6, June. 2013.

[14] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size InC MPPT method for PV systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, 7, July 2008.



김재정 (Jae-Jung Kim)

2015년 3월 ~ 현재: 가천대학교 에너지IT학과 재학
관심분야: 딥러닝, 빅 데이터, IoT, 스마트 폰 어플리케이션



김창복 (Chang-Bok Kim)

1986 2월 : 단국대학교 전자공학화 (공학사)
1989년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
2009년 2월 : 인천대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
1994년 ~ 현재 : 가천대학교 IT대학 에너지 IT학과 교수
※ 관심분야 : 데이터 마이닝, 딥러닝, 강화학습, 사물인터넷