

# 태양광 모듈의 미스매치를 고려한 새로운 최대전력 추종제어 알고리즘 연구

심재휘\*, 최주엽+, 최익\*, 이상철\*\*, 이동하\*\*

\*광운대학교 임베디드 소프트웨어공학(jaehwe@kw.ac.kr), +교신저자 : 광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr)  
\*\*대구경북과학기술원

## A Novel Maximum Power Point Tracking Algorithm Considering the partially shaded in PV generating system

Shim, Jae-Hwe\* Choi, Ju-Yeop+ Choy, Ick\* Lee, Sang-Cheol\*\* Lee, Dong-Ha\*\*

\*Dept. of Embedded Software, Kwangwoon University (jaehwe@kw.ac.kr)

+Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

\*\*Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

### Abstract

The maximum power point tracking(MPPT) is important part of PV generating system, because of nonlinear characteristic of PV array. Many MPPT algorithms have been developed and proposed, but partially shaded in PV generating system, these algorithms can not track maximum power point. This paper explains the partially shaded conditions in the PV generating system and describes a novel new MPPT algorithm. To verify the proposed novel algorithm, PSIM simulation tool is used in this paper, and proper 3kW PV module modeling is made. As a result, the right maximum power point(MPP) of PV PCS can be tracked directly under shading effect for any mismatched condition in solar array.

Keywords : 태양광 컨버터(PV PCS), 최대전력점 추종(MPPT), 그림자 영향(partially shaded), 불평형 상태(mismatched condition)

### 기 호 설 명

$I_{ph}$  : 광 발생 전류

$I_{out}$  : 부하에 흐르는 전류

$V_{out}$  : 태양전지 출력전압

$R_s$  : 내부 직렬저항

$R_{sh}$  : 내부 병렬저항

$q$  : 전하량( $1.6022 \times 10^{-19}$ )

submit date : 2012. 5. 7, judgment date : 2012. 6. 7, publication decide date : 2012. 6. 30.

communication author : Choi, Ju-Yeop(juyeop@kw.ac.kr)

- $B$  : 접합재료 계수  
 $k$  : 볼츠만 상수( $1.38 \times 10^{-23}$ )  
 $T$  : 태양전지의 온도  
 $I_{max}$  : 일사강도가  $1\text{kW/m}^2$ 시 단락전류  
 $V_{oc}$  : 일사강도가  $1\text{kW/m}^2$ 시 개방전압  
 $a$  : 개방전압에 대한 온도계수  
 $\beta$  : 단락전류에 대한 온도계수

## 1. 서 론

태양광 발전 시스템은 태양광을 이용하여 전기를 생산하는 기술로 최근 들어 전 세계적으로 환경오염으로 인한 탄소배출권 규제와 원자력 발전소 사고로 인하여 대체에너지원인 풍력이나 태양광 같은 신재생 에너지의 중요도와 관심이 날로 증가하는 추세이다. 특히, 신재생 에너지원 중 태양광 에너지는 다른 에너지원에 비해 설치 및 운전이 비교적 용이하고, 유지관리 비용이 상대적으로 저렴하기 때문에 주목되어지고 있다. 하지만 전력 발전량에 비해 초기 설치비용이 높고 에너지 밀도 및 효율이 낮아서 발전단가는 높이 평가되고 있는 실정이다. [1] 따라서 태양광 발전 시스템의 출력효율을 높이는 것은 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

태양광 발전시스템에서 사용되는 태양전지는 온도, 일사강도 등의 주변 환경에 따라 비선형 곡선의 전력출력 특성을 가지고 있다. 이에 대하여 최대전력을 발전할 수 있도록 제어하여야 발전효율이 최대가 될 것이다. 최대전력을 생산하기 위한 최대전력추종제어 알고리즘으로는 기존의 P&O, IncCond 등 다양한 방법들이 사용되어져 왔고, 이를 바탕으로 보완 및 개선된 새로운 알고리즘들이 제시되어 왔다. 하지만 최근 태양광 시스템이 대용량화 되고, 도시 등 대형건물 부근에 설치되면서 일부 태양광 모듈이 그림자나 눈 등과 같은 문제로 인하여 모듈간 출력 불평형 상태인 미스매치 현상이 일어나는 문제가 발생하

고 있다. 미스매치인 상황에서의 태양전지는 최대전력점으로 판단할 수 있는 다수의 국부점이 존재하는 비선형적인 출력 특성곡선을 가지게 되는데, 이러한 현상에 대하여 기존에 제시되어졌던 알고리즘들은 최대전력점이 아닌 지점을 최대전력점으로 추종하는 현상이 발생할 수 있다. [2]

본 논문에서는 이러한 미스매치 현상으로 인해 최대전력점이 아닌 저전력점에서 추종제어 발전하는 현상에 대하여 설명하였다. 또한 이를 극복하는 새로운 최대전력 추종제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 태양전지의 특성

### 2.1 태양전지 모델링

일반적으로 사용되는 태양전지의 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

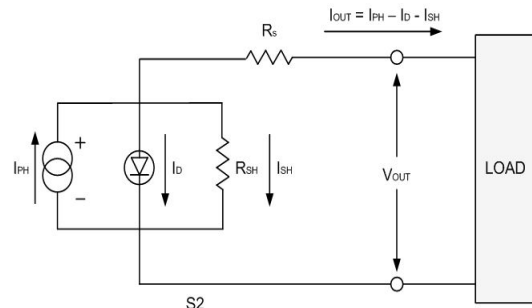


Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

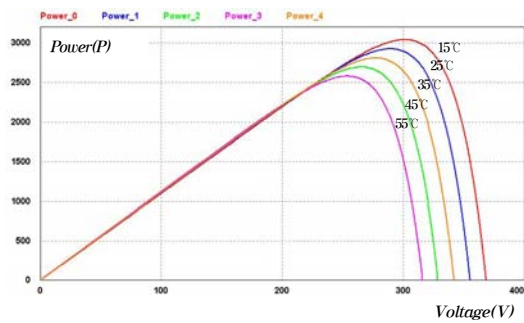
개방전압과 단락전류의 관계는 특히 일사강도와 온도의 변화에 대해 달라지며, 이를 식 1과 같이 간략화시켜 나타낼 수 있다.[3]

$$I_{out} = I_{ph} - \frac{I_{max}}{\exp\left(\frac{q}{BkT} \times Vd\right) - 1} \times \left\{ \exp\left(\frac{q}{BkT} \left(\frac{V_{out}}{V_{oc}} \times K\right)\right) - 1 \right\} \quad (1)$$

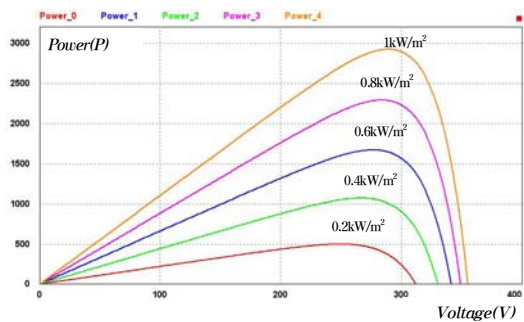
태양전지를 모델링한 식 1을 이용하여 태양전지의 출력특성에 영향을 주는 일사강도와 온도의 변화에 따른 태양전지의 출력특성을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 표 1과 같은 사양의 3kW급 태양전지를 모델링하여 출력특성을 시뮬레이션 하였고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그 결과 일사강도의 변화는 태양전지의 단락전류 값에 영향을 주고, 온도의 변화는 주로 개방전압에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Table. 1 3kW PV array specification

Power	3kW(250W module 6(serial) x 2(parallel))
$V_{op}$	320V
$I_{sh}$	12.6A
Temperature	25°C
$a$	+0.04(Temperature coefficient of $I_{sh}$ )
$\beta$	-0.30(Temperature coefficient of $V_{op}$ )



(a) PV curve under changing temperature



(b) PV curve under changing irradiation

Fig. 2 The Characteristic of the solar cell due to changed temperature or irradiance

## 2.2 태양전지의 미스매치 현상

실제로 설치되는 태양전지는 시스템에서 요구하는 전기적 용량을 가지기 위해 여러개의 태양전지가 직병렬로 연결되어 구성하게 된다. 그러나 일부 태양전지가 눈이나, 그림자 등과 같은 설치 외부환경 요인으로 인해 낮은 출력특성을 가지게 되어 바이패스 되면, 태양전지들간의 출력 불평형으로 인해 최대전력 점이라 추종할 수 있는 국부점들이 다수가 존재하는 비선형적인 출력특성을 가지게 된다. 미스매치에서의 출력특성에 대해 그림 3을 통하여 나타내었다.[5]

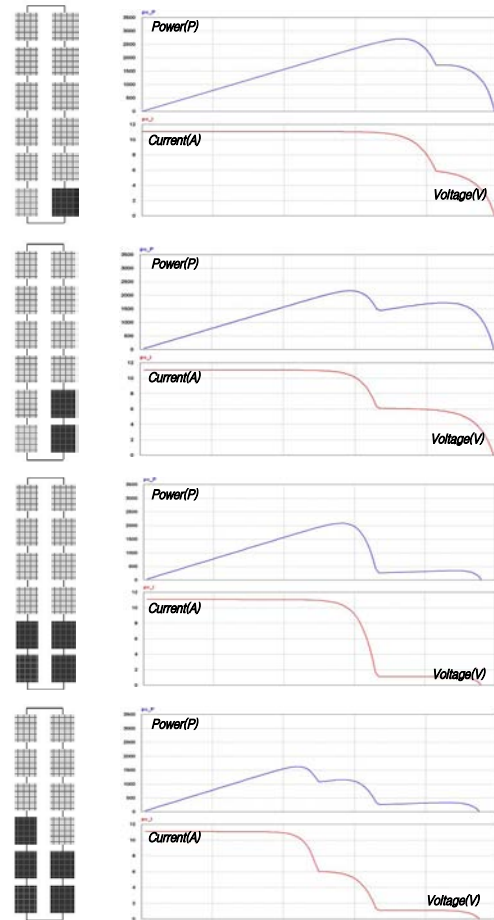


Fig. 3 The characteristic of mismatched PV

### 3. 최대전력점 추종 알고리즘

앞서 설명한 태양전지의 비선형 출력곡선에서 태양전지 출력이 최대 전력을 얻고 또한 최대 효율을 유지하도록 하는 최대전력점 추종 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 미분요소 기법 방법에 대하여 논하고 미스매치 현상을 극복하는 새로운 알고리즘에 대해 설명하고자 한다.

#### 3.1 미분요소기법 알고리즘

미분요소기법 알고리즘은 기존에 제시되었던 P&O 알고리즘 기법을 응용하여 미분요소 값을 증분 값으로 취하는 방법이다. P&O 알고리즘은 태양전지의 출력전압과 전류의 곱에 의한 전력의 변화의 계산을 기초로 크기의 변화분을 통해 최대전력을 구하는 방법이다. 이 방법은 제어가 간단하고 구현이 쉬워서 실제 태양광 발전 시스템에서 가장 널리 사용되는 제어기법이다.[4]

그러나 추종제어 하는데 사용되어지는 전압의 변화분값이 ( $V_{step}$ ) 고정적으로 정해져 있으므로, 결국 추종제어 속도는 전압 지령치의 크기에 의해 결정된다. 미분요소 제어 기법은 이를 극복하여 추종제어하기 위해 가변하는 지령치 전압의 크기에 미분요소 값 ( $dP/dV$ )을 증분값( $V_{step} * dP/dV$ )으로 취해주어, 추종제어 속도를 향상시킨 방법으로 그림 4와 같은 순서도를 가진다.

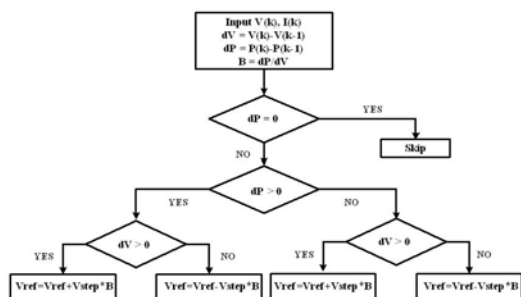


Fig. 4 Flow Chart of derivative MPPT algorithm

#### 3.1 미스매치 현상을 극복하는 새로운 알고리즘

태양전지가 미스매치 현상이 일어나지 않은 정상상태 조건에서의 출력특성을 가지면 미분요소기법 알고리즘만으로도 최대전력점을 추종 제어할 수 있다. 하지만 다수의 국부점이 생기는 미스매치 상황에서 본 알고리즘은 실제 최대전력보다 더 낮은 전력을 추종 제어하는 문제가 발생할 수 있다. 이를 극복하는 새로운 알고리즘을 구현하기 위하여 먼저 표 1의 조건과 같은 3kW 태양전지를 기준으로 일사강도 변화에 따른 최대전력 점에 대한 전압, 전류값을 구하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2에서 나타낸 최대 전력점의 전압, 전류값들은 미스매치로 인한 태양전지간 출력 불평형이 없다면 언제나 정상상태에서 동일한 최대전력점 값을 가지게 되는 태양전지의 출력특성이라고 볼 수 있다.

Table. 2 The value of maximum power, voltage and current due to changed irradiance

Irradiance (kw/m <sup>2</sup> )	V <sub>mpp</sub> (V)	I <sub>mpp</sub> (A)	P <sub>mpp</sub> (W)
0.00	0.0	0.00	0.00
0.05	206.9	0.57	118.22
0.10	220.3	1.15	253.18
0.15	228.1	1.73	394.52
0.20	233.7	2.31	540.02
0.25	238.1	2.89	688.61
0.30	241.6	3.48	839.67
0.35	244.6	4.06	992.79
0.40	247.2	4.64	1147.68
0.45	249.5	5.23	1304.10
0.50	251.6	5.81	1461.89
0.55	253.4	6.40	1620.92
0.60	255.1	6.98	1781.07
0.65	256.7	7.57	1942.25
0.70	258.2	8.15	2104.38
0.75	259.5	8.74	2267.39
0.80	260.8	9.32	2431.22
0.85	262.0	9.91	2595.83
0.90	263.1	10.49	2761.16
0.95	264.1	11.08	2927.18
1.00	265.2	11.67	3093.85

그러나 앞서 태양전지는 일사강도 뿐만 아니라 온도에 대하여도 출력특성이 변화한다고 하였으므로 온도계수를 고려하여 전압과 전류의 변화량을 차감해야 기준온도(25℃)에서 나타나는 표 2의 값들의 타당성을 가지게 된다. 이를 위해 표 1의 태양전지 특성인 온도계수를 통하여 식 (2)를 통해 기준온도에서의 전압과 전류를 구한다.

$$V_{op} = V_{op(25^\circ\text{C})} - (V_{op(25^\circ\text{C})} \times \alpha)$$

$$I_{sh} = I_{sh(25^\circ\text{C})} - (I_{sh(25^\circ\text{C})} \times \beta)$$
(2)

표 2의 값들은 태양전지의 정상상태에 대한 출력특성이므로 만약, 태양광 시스템이 최대 전력을 추종 제어할 때, 식 (2)를 통한 기준온도의 출력특성으로 바꾼 전압과 전류의 크기가 표 2의 값과 비교했을 때 오차가 어느 정도 크다면 태양전지는 정상상태가 아닌 출력 불평형상태라 판단할 수 있다. 따라서 미스매치인 상황을 판단하기 위한 기준값인 표 2의 값들을 수식으로 정의하여 구한다면 태양전지가 정상상태인지 미스매치인지 판단할 수 있는 기준이 된다. 이를 위해 그림 5처럼 표 2의 값들을 전압-전류 곡선으로 나타내어 보면, 비선형적인 곡선의 형태로 최대전력점들이 분포되어져 있음을 알 수 있다. 따라서 미스매치 상황에 대한 판단 기준값인 그림 5의 전압, 전류 곡선을 수식화 하고자 한다. 이를 위하여 3차 다항식으로 놓고 연립일차방정식으로 풀어 방정식을 정의하였다.

3차 다항식으로 정의하기 위해 식(3)과 같은 행렬로 놓고, 최대전력 전류값인 표 2의 데이터를 근거로 하여 표본점 4개를 식 (4)와 같이 대입하고 이를 역행렬로 풀어 식 (5)와 같은 최대전력점 방정식으로 표현하였다.

식 (5)를 통하여 추종제어하고 있는 최대전력점 전압에서의 전류값이라 계산되는 값들을 구하고, 이를 그림 6과 같이 나타내었다. 계산된 값들은 앞서 기준값인 그림 5의 값과

비교하면 근소한 오차(최대 2%)를 보이며 거의 일치함을 확인하였다.

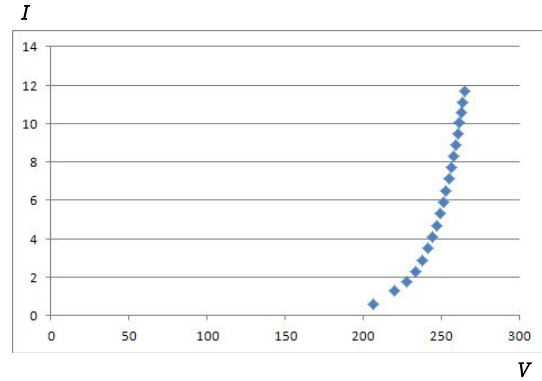


Fig. 5 The real maximum current point of normal PV modules

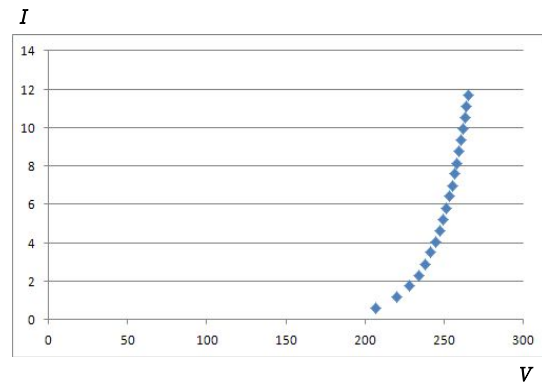


Fig. 6 The equation maximum current point of normal PV modules

$$\begin{bmatrix} x^3 & x^2 & x & 1 \\ x^3 & x^2 & x & 1 \\ x^3 & x^2 & x & 1 \\ x^3 & x^2 & x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ y \\ y \\ y \end{bmatrix}$$
(3)

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 206.9^3 & 206.9^2 & 206.9 & 1 \\ 233.7^3 & 233.7^2 & 233.7 & 1 \\ 241.6^3 & 241.6^2 & 241.6 & 1 \\ 265.2^3 & 265.2^2 & 265.2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.57 \\ 2.31 \\ 3.48 \\ 11.67 \end{bmatrix}$$
(4)

$$0.00006721x^3 - 0.04345342x^2 + 9.412959321x - 682.10311 = y$$
(5)

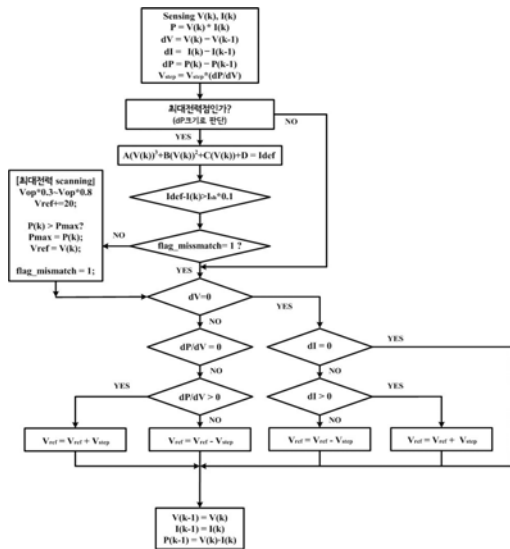


Fig. 7 Flow Chart of proposed MPPT algorithm

그림 7은 미스매치 판단 수식인 (5)를 통하여 본 논문에서 제안하는 알고리즘 순서도를 나타내었다. 본 알고리즘은 크게 두가지 모드로 동작하게 되는데, 기본적으로는 미분요소 기법으로 동작하며 최대전력 추종제어를 수행하게 되고, 앞서 구한 식 (5)를 통해 미스매치임을 판단했을 때에는 일정구간을 스캐닝하여 올바른 최대전력을 찾는 모드로 동작한다. 미스매치임을 판단하기 위해서는 최대전력점에 동작했을 때의 값을 알아야 하는데, 이는 변화하는 전력의 변화분(dP)이 현저히 작은 경우에는 최대전력점에 수렴하여 제어하고 있다고 판단할 수 있다. 따라서 이 때 추종제어하고 있는 전압값에 대하여 식(2)를 통하여 기준온도에 대한 전압값으로 바꾸고, 이를 식(5)를 통해 구한 정상상태에서의 최대전력점에 대한 전류값과 비교해 보았을 때의 오차가 일정수준(10%)을 벗어난다면 정상상태가 아닌 미스매치인 태양전지로서 올바른 최대전력을 추종하지 않을 수 있다고 판단할 수 있다. 이 경우 전압지령치(V<sub>ref</sub>)값을 V<sub>op</sub>의 30%에서 80%까지 순차적으로 스캐닝하면서, 본 구간에서의 올바른 최대전력점을 찾아 바로

지령치 전압값으로 제어한다면 올바른 최대전력점 값을 추종제어 할 수 있게 된다.

#### 4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 태양광 모듈과 MPPT 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 제어부만을 구성하여 태양전지 모델링과 승압형 컨버터로 구성하였다. 표 1의 3kW급 태양전지를 기준으로 표 3과 같은 승압형 컨버터의 소자값을 선정하였으며, 태양광 모듈이 정상상태일 때, 일사강도가 변화에 따른 최대전력을 올바르게 추종제어 하는지와 태양광 모듈의 미스매치인 상황에서 올바르게 제어하고 있는지를 확인해 보았다. 그림 8은 본 시뮬레이션을 위해 구성한 PSIM 회로도이다.

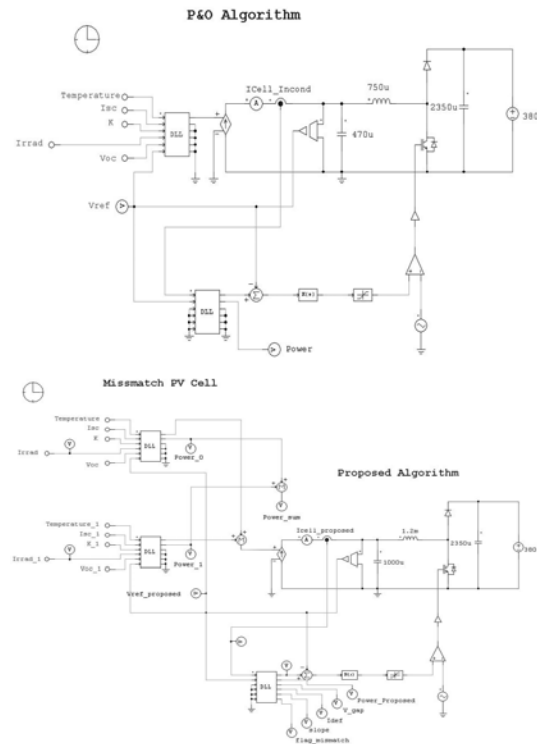


Fig. 8 The circuit of 3kW PV module and Boost Converter

Table. 3 Boost Converter parameter

$L$	1mH
$C(input)$	1,000uF
$C(output)$	2,400uF
switching frequency	18kHz
MPPT frequency	1kHz

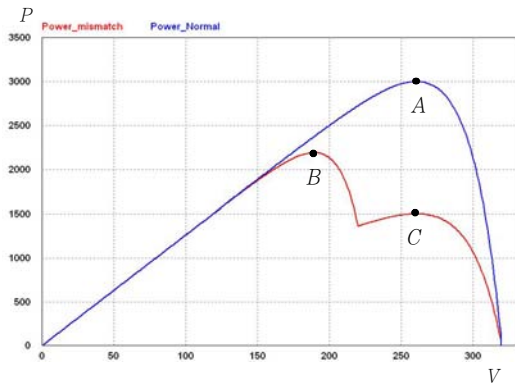


Fig. 9 P-V Characteristic of the normal and mismatch PV modules

#### 4.1 P&O알고리즘과 제안된 알고리즘 비교

먼저 태양광 모듈이 정상상태에서 일사강도가 변화하였을 때, 본 알고리즘이 기존의 P&O 알고리즘보다 추종제어 속도가 우수한지를 검증해 보았다. 그 조건으로 일사강도가  $0.5kW/m^2$ 에서  $1.0kW/m^2$ 으로 급격하게 변화하였을 경우 빠르게 최대전력점을 추종제어 하고 있는지를 검증해보고자 하였다. 정상상태에서의 태양광 모듈이 일사강도가 최대일 때, 그림 9처럼 하나의 언덕점인 최대전력점 A를 가지게 되고 이를 올바르게 추종 제어하여야 한다. 그 결과 미분요소 기법 알고리즘이 그림 10처럼 기존의 P&O 알고리즘보다 제안하는 본 알고리즘이 빠르게(약 3배) 추종제어를 할 수 있었고, 최대전력점에 머문 정상상태일 경우 진동폭이 현저하게 줄어들게 됨을 알 수 있다. 미분요소기법 알고리즘은 추종치 전압에 0에 가까운 미분요소( $dV/dP$ )값을 증분하므로 진동폭이 매우 작아 알고리즘이 안정적임을 확인할 수 있다.

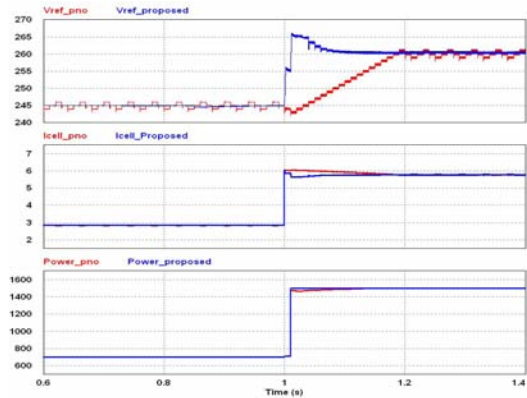


Fig. 10 P&O vs. proposed algorithm simulation result of normal PV modules under changing of irradiation( $0.5 \rightarrow 1.0kW/m^2$ )

#### 4.2 미스매치 태양광 모듈에서의 미분요소 기법과 제안된 알고리즘 비교

앞서 설명한 태양광 모듈의 출력 불균형으로 인한 미스매치 상황에서는 그림 9와 같이 최대 전력점이라 제어할 수 있는 B, C 두 개의 국부적인 언덕점(local climbing hills)들이 발생하게 된다. 이러한 미스매치 상황에서 기존의 미분요소 제어기법 알고리즘과 제안된 알고리즘이 결합하여 C점이 아닌 더 높은 전력점인 B점을 올바르게 추종제어하는지를 검증해 보았다.

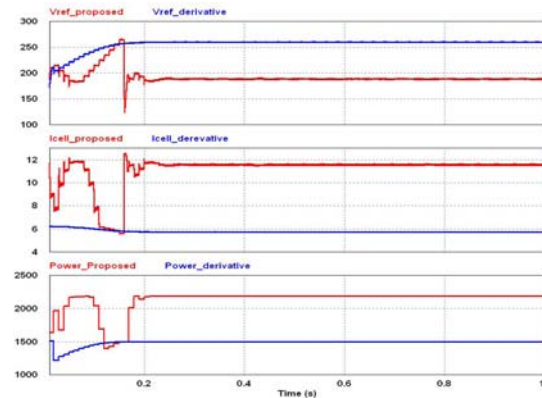


그림 11 미스매치 상황에서 제안한 알고리즘 시뮬레이션 결과

Fig. 11 The simulation result of proposed algorithm for mismatched PV modules

시뮬레이션 검증 결과 그림 11과 같이 기존의 미분요소기법 알고리즘은 태양광 모듈이 미스매치 상황일 때, 그림 9의 C점인 1.5kW를 최대전력점으로 추종제어하고 있는 반면, 제안된 알고리즘은 그림 9의 B점인 2.2Kw를 최대전력점으로 제어하고 있으므로 더 높은 올바른 최대전력점을 통해 발전효율을 극대화 한다고 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 정상상태의 태양광 모듈과 미스매치 상황인 태양광 모듈에 대하여 설명하고, 미스매치인 상황에서 기존의 최대전력 추종제어 알고리즘이 올바른 최대전력을 추종하지 못하는 상황을 극복하는 최대전력 알고리즘을 제안하였고, 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 본 알고리즘을 통하여 기존의 알고리즘이 지니는 전력손실을 극복하고 안정성을 향상시켜 올바른 최대전력점을 추종토록 하여 태양광 발전시스템의 효율을 극대화 하고자 하였다.

향후 연구계획으로는 본 알고리즘을 실험을 통해 구현 및 검증하여 본 알고리즘의 타당성을 확인하는 계획을 가지고 있다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업(12-BD-0101)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Eduardo Román, Ricardo Alonso, Pedro Ibañez, "Intelligent PV Modules for Grid-Connected PV Systems," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2006, pp. 1066-1073
2. D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. dela Casa, J. Aguilera, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses," Solar Energy 84, 2010, pp.1301-1309
3. N.D. Kaushika, Anil K. Rai "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks," Energy 32, 2007 pp.755-759
4. C. R. Sullivan and M. J. Powers, "A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic array in a solar-powered race vehicle," Proceedings of the IEEE, 1993, pp. 574-580
5. Hussein, K.H. Muta, I. Hoshino, T. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," IEE Proceedings-Volume 142, Issue 1, Jan. 1995, pp. 59-64