

# 개선된 PO 방법을 이용한 태양광 발전의 MPPT 제어

## MPPT Control of PV System using Improved PO Method

고 재 섭\* · 정 동 화†  
(Jae-Sub Ko · Dong-Hwa Chung)

**Abstract** - This paper proposes the method which is improved a performance of PO MPPT control in PV system. The PO method is continually changed voltage toward direction that increases power, and if output power is decreased by changing voltage, a power of the conventional PO method is changed to a power before one step. These operations causes reduce of MPPT performance. Therefore, this paper proposes the MPPT method that can be improved the performance of the conventional PO method. When voltage is changed to direction of reducing power, the method proposed in this paper is changed to the voltage the opposite direction of twice step size. The MPPT performance of proposed method in this paper is compared with conventional PO method and proved the validity of this paper using these results.

**Photovoltaic** : MPPT Algorithm, Perturbation & Observation

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 자원이 고갈되어 유가가 상승하고 지구의 온난화가 지속되는 등 환경문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 태양, 지열, 풍력 및 조력 등 대체 에너지인 신재생 에너지에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. PV 모듈에서 발생하는 전력은 일사량, 온도 및 그림자 조건에 의해 좌우된다. 최대전력점은 일사량과 셀 온도에 의해 결정되며 이는 시시각각으로 변한다. 따라서 급변하는 파라미터를 추적하여 최대전력점을 얻기 위한 연구가 필요하며 이를 해결하기 위하여 다양한 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어가 제시되었다[2]. 태양전지의 특성은 변하지 않지만 최대 출력 동작점이 변하기 때문에 최대 출력을 얻도록 동작시키는 MPPT 제어 방법은 PO (Perturbation and Observation) 제어방법, IC (Incremental Conductance) 제어방법, CV(Constant Voltage) 제어방법 등이 대표적이다[2]. 이러한 방법은 일사량이 급변하는 경우에 MPP를 추적하지 못하고, 계산량이 많아 고성능 CPU가 요구되며 추적효율이 낮다는 단점이 있다[3]. PO 방법은 제어가 비교적 간단하며 만족할만한 MPPT 성능을 얻을 수 있다는 장점으로 태양광 발전시스템에 많이 사용되고 있다. 그러나 종래의 PO 방법은 전압의 변화에 따른 전력의 변화를 측정하여 전력이 증가하는 방향으로 전압을 변화시켜 최대전력점을 추적

한다. PO 방법에서 전압의 변화에 따라 전력이 감소할 경우에는 스텝 크기의 변화 방향을 반대로 하여 전력을 증가시키게 되는데 종래의 방법은 이전에 변화한 크기만큼 반대로 이동하여 바로 전 상태의 전력이 된다. 이러한 동작은 MPPT의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 이를 개선하여 MPPT 성능을 효율적으로 동작할 수 있도록 한다. 본 논문에서 제시한 방법은 전압이 변화하여 전력이 감소하는 경우에는 동일한 스텝 크기만큼 반대로 이동하지 않고 2배의 스텝 크기 변화를 주어 종래의 PO 방법보다 우수한 응답특성을 나타내도록 한다.

### 2. 태양전지 모델링

태양전지는 p-n 접합으로 이루어지며 빛이 조사될 때 광기전력 효과를 이용하여 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 여기서 광기전력 효과란 p-n 접합에 빛을 조사시킬 때 빛에 의하여 전자-정공이 발생하면 공핍층 내에 전계 때문에 전자는 n형 영역으로 이동하고 정공은 p형 영역으로 이동한다. 이동된 전자-정공 때문에 열평형 상태에 비해 캐리어 농도가 상승하여 p형 반도체와 n형 반도체 사이의 농도 차이에 따라 기전력이 발생하는 효과이다.

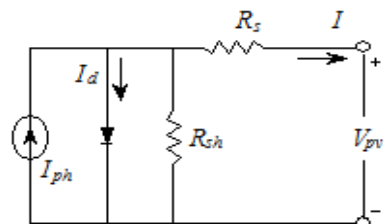


그림 1 태양전지의 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

+ Corresponding Author : Dept. of Electrical Control Engineering, Suncheon National University, Korea.  
E-mail : hw777@suncheon.ac.kr

\* Dept. of Electrical Control Engineering, Suncheon National University, Korea.

Received : August 22, 2014; Accepted : November 27, 2014

태양전지의 등가회로는 그림 1과 같이 나타내며, 태양전지의 출력 전류에 대한 식은 다음 등가회로를 기반으로 식 (1)~(2)와 같이 나타낼 수 있다[1-2][4,6].

$$I = I_{sc} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{(V_{pv} + R_s I)}{R_{sh}} \quad (2)$$

여기서,  $I_{ph}$ 는 광전류,  $I_d$ 는 다이오드 포화전류이다. 광전류  $I_{ph}$ 는 일사량과 온도에 따라 변화되며 다음 식과 같다.

$$I_{ph} = [I_{sc} + I_t(T_c - T_r)] \frac{S}{S_{ref}} = [I_{sc} + I_t(T_c - T_r)] S_N \quad (3)$$

$I_{ph}$ 의 크기를 갖는 정 전류원으로 구성되어 있지만 실제로는 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트저항 등을 표시하는 직렬저항  $R_s$ 와 병렬저항  $R_{sh}$ 을 고려해야 한다.

다이오드 전류를 쇼클리 방정식에 의해서 정리하면 다음 식과 같다.

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] \approx I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{kT}\right) \right] \quad (4)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left[ \frac{T_c}{T_r} \right]^3 \left[ \exp\left(\frac{qE_g}{Bk} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \right] \quad (5)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리한 부하전류는 다음 식과 같다[5].

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[ \frac{q}{nkT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

여기서,

- I : 셀 출력 전류
- V : 셀 출력 전압
- $I_{ph}$  : 광 전류
- $I_0$  : 역 포화 전류
- q : 전하량( $1.6 \times 10^{-19}$  [C])
- $R_s$  : 직렬 저항[Ω]
- n : 이상적인 factor
- k : 볼츠만 상수( $1.3805 \times 10^{-23}$  [J/K])
- T : 셀 온도
- $R_{sh}$  : 병렬 저항[Ω]

병렬저항  $R_{sh}$ 는 수 백 Ω에서 수 kΩ 이상의 상대적으로 아주 큰 값을 가지므로 병렬저항을 무시하여 해당 선로를 개방상태로 간주할 수 있으며 이때의 등가회로는 그림 2와 같다.

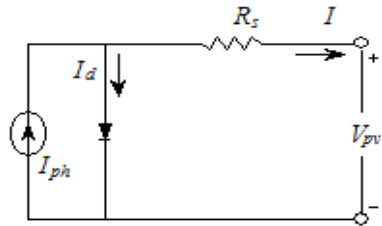


그림 2 태양전지의 이상적인 등가회로  
Fig. 2 Ideal Equivalent circuit of solar cell

$R_s = 0, R_{sh} = \infty$ 인 이상적인 등가회로에서 부하에 흐르는 전류 I는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

이러한 식을 이용하면 그림 3과 같은 태양전지 어레이의 출력 특성을 얻을 수 있다. 태양전지의 특성곡선은 일사량과 셀의 온도 등 여러 가지 환경적인 요소에 크게 영향을 받는다. 이는 일사량과 태양전지 단락전류와의 관계에 기인하게 되며 태양전지의 모델링으로 나타낼 수 있다. 또한 온도가 상승할수록 개방전압이 하강하여 P-V 곡선이 온도상승에 따라 왼쪽으로 이동한다. 개방전압은 전류가 0일 때 태양전지 양단에 나타나는 전압으로 태양전지로부터 얻을 수 있는 최대 전압에 해당한다[1].

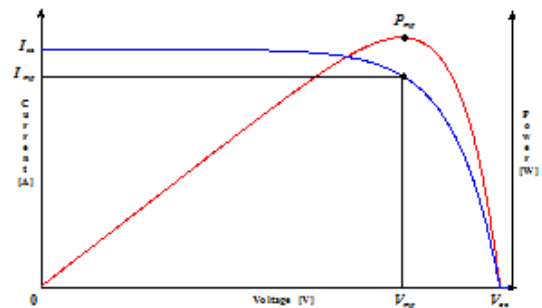


그림 3 태양전지의 I-V와 P-V 특성곡선  
Fig. 3 I-V and P-V characteristics waveform of a solar cell

그림 4는 일사량을  $400[W/m^2]$ 에서  $1,000[W/m^2]$ 까지  $200[W/m^2]$ 씩 증가시켰을 때 일사량에 따른 태양전지의 출력 특성을 낸다. 그리고 일사량의 변화 시 태양전지의 개방전압은 큰 변화가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는  $25[^\circ C]$ 에서  $85[^\circ C]$ 까지  $20[^\circ C]$ 씩 증가하였을 때 온도 변화에 따른 태양전지의 출력특성을 나타낸다. 그리고 일사량이 변화한 경우에 비해 온도가 변화한 경우에는 전류의 변화보다 전압 변화가 큰 것을 알 수 있다. 그림 5에서 셀 표면의 온도가 증가할 때 출력이 크게 변화되고 있음을 알 수 있다. 따라서 태양전지의 출력은 일사량과 온도에 의해서 영향을 받으며 특성분석을 위해서는 일사량과 온도를 반드시 고려해야 한다.

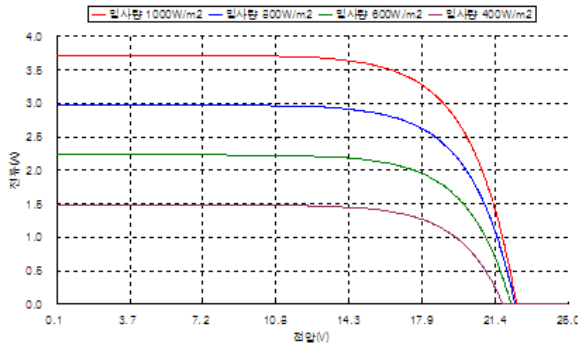


그림 4 일사량 변화에 대한 I-V 특성곡선  
Fig. 4 I-V characteristic curve with radiation changing

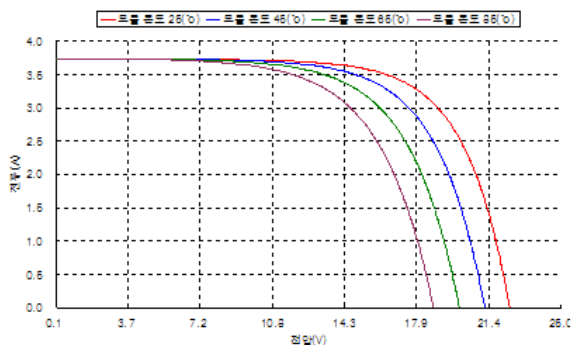


그림 5 온도 변화에 따른 I-V 특성 곡선  
Fig. 5 I-V characteristic curve with temperature changing

### 3. MPPT 제어 알고리즘

MPPT의 제어방법은 하드웨어적인 분류 방식으로 아날로그 방식과 디지털 방식이 있으며, 알고리즘 측면에서는 PO, IC 및 CV 제어 방법이 있다. 또한 새로운 방식의 MPPT 제어 방법에 대해 현재까지 많은 연구 성과가 보고되고 있다. MPPT 제어 방법은 일사량과 표면 온도의 변화에 영향을 받는 태양전지의 MPP를 추종하여  $V_{ref}$  값으로 출력된다.

MPP는 동일 일사량에서 발생하는 전력이 출력 전압에 따라 변하기 때문에 MPPT 제어를 하지 않을 경우 태양전지는 MPP에서 발전하지 못하여 태양전지의 발전효율이 저하되고 손실이 발생된다. 따라서 일사량 조건과 부하조건 변화에 따라 최적의 동작전압을 추종하는 MPPT 제어가 필요하다.

#### 3.1 PO MPPT 제어 알고리즘

PO MPPT 제어 방법은 간단한 피드백 구조를 가지며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지 전압을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 동작하며, 이전의 교란주기 동안의 태양전지 어레이 출력 전력과 함께 현재 어레이의 출력 전력을 비교하여 MPP를 연속적으로 추적하며 찾는다. 이 방법은 그림 6과 같은 제어 알고리즘에 의해 동작한다.

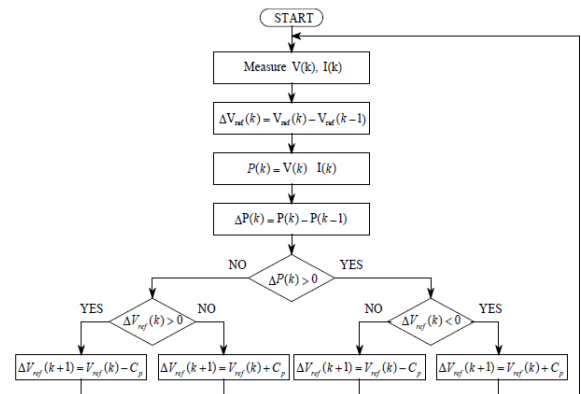


그림 6 종래의 PO MPPT 제어 알고리즘  
Fig. 6 MPPT control algorithm of conventional PO method

그림 6의 제어 방법은 다음과 같이 설명한다. 전력이 증가하면 교란은 다음 주기 동안 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 의미한다. 그러므로 MPP에 이르렀을 때 PO 제어 방법은 급변하는 환경조건에서 자려진동 할 것이며, 그 결과 태양전지 어레이에서 손실이 발생하게 된다. 이 문제는 MPP에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기 동안 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위한 PO 제어 방법의 개선으로 해결할 수 있다. 전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란 스텝의 감소가 있다. 그러나 이 방법은 환경 조건이 급하게 변할 경우 MPP 추적 속도가 늦어지게 되므로 스텝의 결정이 중요하게 된다[2][7].

#### 3.2 개선된 PO MPPT 제어 알고리즘

PO 방법의 동작 상태는 그림 7과 같이 4가지로 구분할 수 있다. 그림 7(a)는  $\Delta P_{pv} > 0, \Delta V_{pv} > 0$ 인 경우이고, 그림 7(b)는  $\Delta P_{pv} > 0$ 고  $\Delta V_{pv} < 0$ 인 경우이고, 그림 7(c)는  $\Delta V_{pv} < 0$ 고  $\Delta P_{pv} > 0$ 인 경우이며, 그림 7(d)는  $\Delta V_{pv} < 0$ 고  $\Delta P_{pv} < 0$ 인 경우이다.

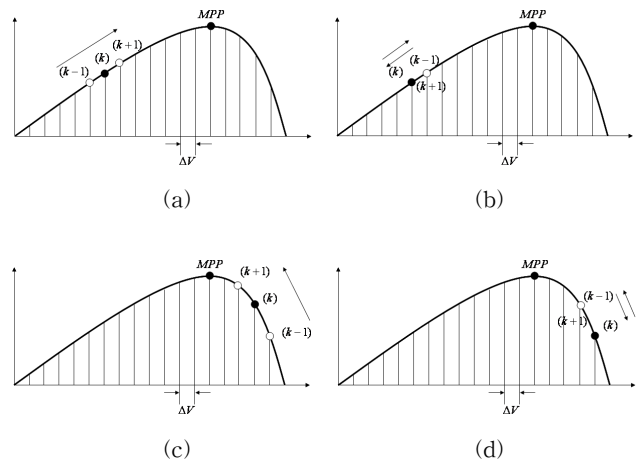


그림 7 동작점 변위  
Fig. 7 displacement of operating point

그림 7에서 (b)와 (d)의 경우 전압이 전력을 감소하는 잘못된 방향으로 변동하였을 경우에 같은 스텝 크기만큼 반대방향으로 이동할 경우 바로 이전 상태의 전력으로 변화한다.

그림 8은 그림 7의 (b)와 (d) 부분을 개선한 방법의 동작점 변화를 나타낸다.

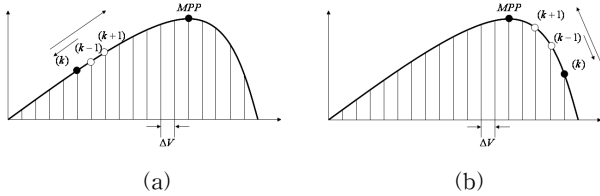


그림 8 개선된 동작점 변위  
Fig. 8 Improved displacement of operating point

그림 8(a)는 그림 7(b)의 경우에 해당하고 그림 8(b)는 그림 7(d)의 경우에 해당한다. 그림 8의 경우 그림 7에 비하여 잘못된 방향으로 전압이 변화하였을 경우에 반대방향으로 2배 만큼의 스텝 크기가 변동하여 전력이 증가하는 방향으로 더욱더 빠르게 변화하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 7과 8을 기준으로 다양한 동작점에 대한 제어 동작의 개요는 표 1과 같다.

표 1 다양한 동작점에 대한 제어 동작의 개요  
Table 1 Summary of control action for various operating point

Case	$\Delta V_{pv}$	$\Delta P_{pv}$	Tracking direction	V : voltage
1	+	+	Good direction	$V(k) = V(k-1) + \Delta V$
2	-	+	Good direction	$V(k) = V(k-1) - \Delta V$
3	+	-	Bad direction	종래 : $V(k) = V(k-1) - \Delta V$
				제시 : $V(k) = V(k-1) - 2\Delta V$
4	-	-	Bad direction	종래 : $V(k) = V(k-1) + \Delta V$
				제시 : $V(k) = V(k-1) + 2\Delta V$

PO 방법은 표 1과 같이  $\Delta V_{pv}$ 와  $\Delta P_{pv}$ 의 극성에 따라 섭동

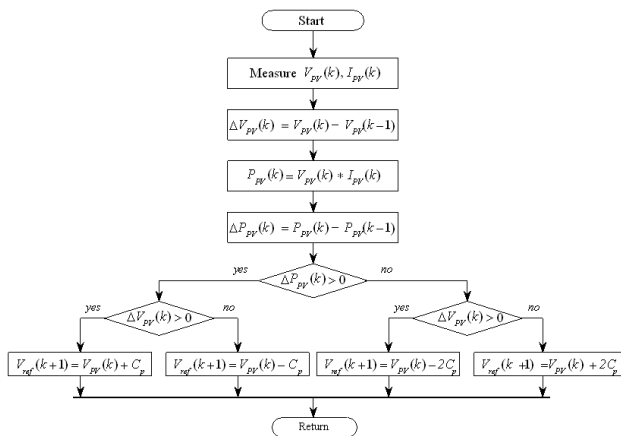


그림 9 개선된 PO 방법의 제어 알고리즘  
Fig. 9 Improved control algorithm of PO method

방향을 조절하여  $V_{ref}$ 를 결정하는 방법이다.

그림 9는 개선된 PO 방법의 제어 알고리즘을 나타내고 있다.

#### 4. 시스템 성능결과

MPPT 제어는 PSIM을 사용하였으며 각각의 MPPT 회로도로 그림 10과 같이 구성하였고 표 2는 PV 모듈의 파라미터를 나타낸다.

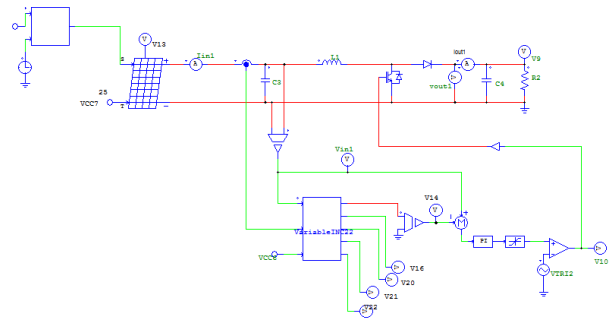


그림 10 MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도  
Fig. 10 PSIM circuit for MPPT control

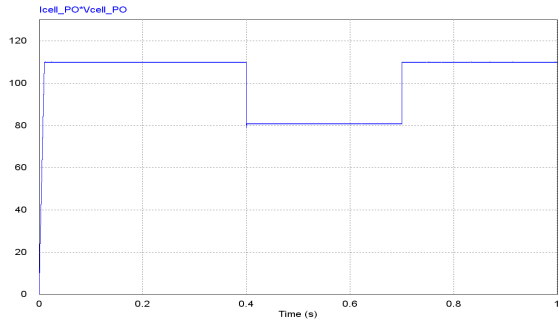
표 2 PV모듈의 파라미터  
Table 2 Parameter of PV module

파라미터	기호	측정값	단위
개방전압	$V_{oc}$	41.2	$[V_{dc}]$
단락전류	$I_{sc}$	3.69	$[A]$
최대전력 전압	$V_{np}$	32.9	$[V_{dc}]$
최대전력 전류	$I_{np}$	3.34	$[A]$
최대전력	$P_{np}$	110	$[W]$

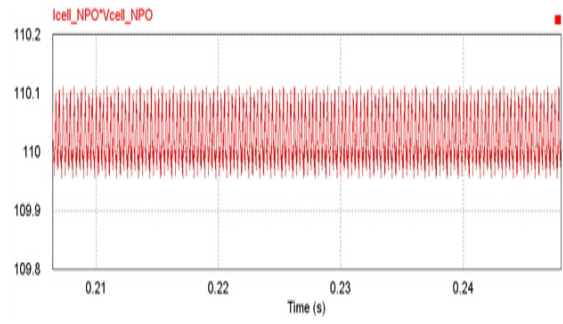
그림 11은 일사량이  $1,000[W/m^2] \rightarrow 700[W/m^2] \rightarrow 1,000[W/m^2]$ 으로 변화하였을 때 종래의 PO 방법과 개선된 PO 방법의 출력 전력 비교를 나타낸다.

그림 12는 그림 11에서 최대전력점 추적속도를 비교하기 위하여 확대한 그림을 나타낸다. 그림 11(a)는 종래의 PO 방법, 그림 11(b)는 본 논문에서 제시한 개선된 PO 방법의 출력전력을 나타낸다. 본 논문에서 제시한 방법이 종래의 PO 방법보다 더욱 빠르게 정상상태에 도달하고 있다.

그림 13은 그림 12의 정상상태의 오차 부분을 비교하기 위해 확대한 그림을 나타낸다. 그림 13(a)는 종래의 PO 방법, 그림 13(b)는 본 논문에서 제시한 개선된 PO 방법의 출력전력을 나타낸다. 종래의 PO 방법의 정상상태 리플은 Peak to Peak 로 나타내었을 때  $109.93-110.12[W]$ 로 약  $0.19[W]$ 를 나타내며 본 논문에서 제시한 방법은  $109.95-110.11[W]$ 로 약  $0.16[W]$ 의 정상상태 리플을 나타낸다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법이 종래의 PO 방법에 비하여 더욱 우수한 응답특성을 나타내고 있다.



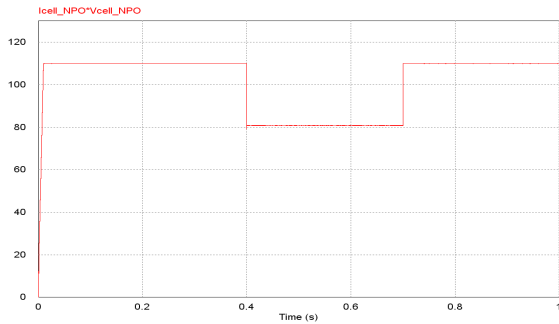
(a)



(b)

그림 13 정상상태 오차 비교

Fig. 13 Comparison of error in steady-state



(b)

그림 11 일사량 변화에 대한 출력전력 비교

Fig. 11 Output power comparison with radiation changing

그림 14는 MPPT 제어 특성 분석을 위해 사용된 실험장치를 나타낸다. 제어기는 TI사의 DSP 중 C2000계열의 TMS320F2406을 사용하였고 스위칭 소자는 SEMIKRON사의 SK45GH063를 사용하여 구성하였다. 그림 15는 본 논문에서 제시한 MPPT 알고리즘의 제어결과를 나타내고 있다. 본 논문에서 제시한 MPPT 제어가 원활하게 수행되고 있음을 알 수 있다.

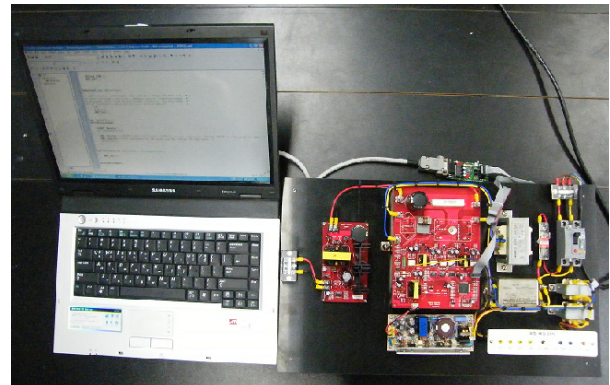


그림 14 MPPT 제어를 위한 실험장치

Fig. 14 Experimental equipment for MPPT control

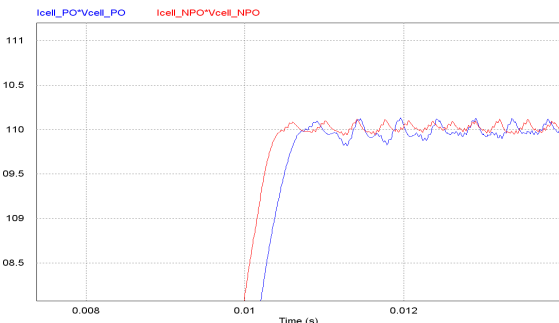
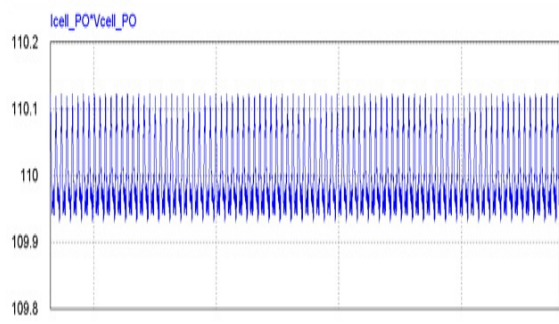


그림 12 추적속도 비교

Fig. 12 Comparison of tracking speed



(a)

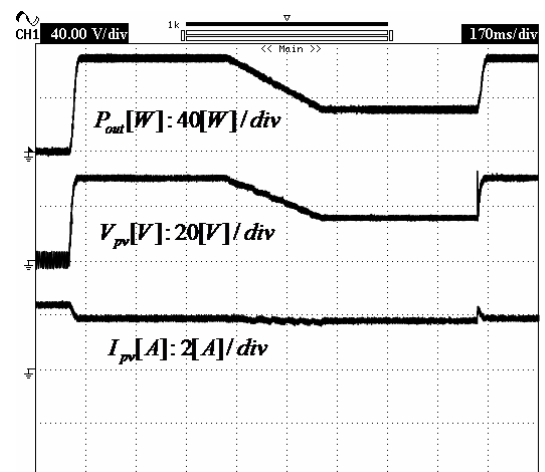


그림 15 제시한 MPPT 방법의 MPPT 제어 결과

Fig. 15 MPPT control result of proposed MPPT method



## 5. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전시스템의 최대전력점 제어를 위해 가장 많이 사용되는 PO 방법의 성능을 개선하기 위한 방법을 제시한다. PO MPPT 방법은 전압을 증·감 시켜 전력이 증가할 수 있는 방향으로 계속 변화하여 최대전력점을 추적하는 방법이다. 이러한 PO 방법에서 전압의 변동 방향이 잘못되었을 경우 반대방향으로 전압을 변화시키는데 이전에 이동한 전압의 크기만큼 이동할 경우 바로 전 상태의 전력이 되기 때문에 최대전력점 추적성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 잘못된 방향으로 전압이 변동하였을 때 반대방향으로 2배의 스텝 크기를 변동함으로써 추적성능을 개선한다. 본 논문에서 제시한 방법은 종래의 방법과 추적속도 및 정상상태 오차에 대하여 비교하였으며 추적속도 및 정상상태 오차에서 모두 양호하게 나타났다.

## References

- [1] J. S. Ko, "Intelligent MPPT Control and PV module Configuration Considering Environment Conditions of Photovoltaic System" Sunchon university, 2012.
- [2] J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, "Development of VPO MPPT of PV System Considering Shadow Influence" KIPE, vol. 16, no. 5, 2011.
- [3] M. G. Jang, J. S. Choi, D. H. Chung, "A Novel MPPT Control of photovoltaic Generation Using Algorithm" KIEE, vol. 60, no. 10, 2011
- [4] Jin-Gook Lee Jae-Sub Ko Da-Eun Jeong Dong-Hwa Chung, "MPPT Control of Photovoltaic System using the Two-Mode IC Method" ICROS, vol. 2012, No. 10, 2012.
- [5] Lixia Sun, Zheng dan dan, Fengling Han, "Study on MPPT Approach in Photovoltaic System Based on Fuzzy Control" ICIEA, 2013
- [6] J. H. Shim, S. D. Yang, S. H. Jung, J. Y. Choi, I. Choi, J. U. An, D. H. Lee, "Analysis of various MPPT algorithm for PCS" KSES, vol. 31, no. 2, 2011
- [7] D. K. Sharma, G. Purohit, "Advanced Perturbation and Observation (P&O) based Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a Solar Photo-Voltaic System" IICPE, 2012

## 저 자 소 개



### 고 재 섭(Jae-Sub Ko)

2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업 2007년 2월순천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)

Tel : 061-750-3540, Fax : 061-750-3540

E-mail : kokos22@scnu.ac.kr



### 정 동 화(Dong-Hwa Chung)

1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원.1989년~현재 순천대학교 전기제어공학과 교수.

Tel :061-750-3543, Fax : 061-750-3540

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr