

# 가변 IC 방법을 이용한 태양광 발전의 MPPT 제어

(MPPT Control of Photovoltaic using Variable IC Method)

고재섭\* · 정동화\*\*

(Jae-Sub Ko · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

This paper proposes variable incremental conductance(IC) algorithm for maximum power point tracking(MPPT) control of photovoltaic. The conventional perturbation & observation(PO) and IC MPPT control algorithm generally uses fixed step size. A small step size reduces a tracking error in the steady state but slows a tracking speed in the transient state. Also, a large step size is fast a tracking speed but increases a tracking error. Therefore, this paper proposes variable IC MPPT algorithm that adjust automatically step size according to operating conditions. To improve a tracking speed and accuracy, when operating point is far from the maximum power point(MPP), the step size uses maximum value and when a operating point is near from the MPP, the step size uses variable step size that adjust according to slope of  $P-V$  curve. The validity of MPPT algorithm proposed in this paper prove through compare with conventional PO and IC MPPT algorithm.

Key Words : PV System, MPPT, PO, IC, Variable Step Size,  $P-V$  Curve

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 석유자원의 고갈 및 고유가, 기후변화협약 발효에 따라 국제적인 새로운 환경 및 무역질서의 도래, 중국·인도 등 거대 개발도상국의 에너지 수요 증가 등에 따라 에너지 환경에 대한 새로운 도전과 변화를 맞이하고 있다[1]. 이에 따라 세계 각국은 전략적이고 지속적인 대체 및 신재생에너지의 개

발과 보급을 위해 태양광 발전에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다[2]. 태양에너지는 친환경적이고 무한한 에너지원이며, 또한 태양광 발전 시스템은 발전을 위한 별도의 구동부가 필요 없고 소음이 없으며 유지비가 적게 든다는 장점을 가지고 있다. 이러한 태양광발전 시스템의 출력 효율을 높이기 위하여 MPPT 제어를 이용하고 있다[3-4].

태양광 발전의 최대전력점은 일사량과 온도에 따라서 변화한다. 이러한 최대전력점을 찾기 위한 종래의 방식으로는 PO와 IC방식 등이 있다[5-6]. 그러나 이러한 방식들은 고정된 스텝 크기를 가지고 있기 때문에 과도상태와 정상상태에서의 응답특성을 모두 만족시키는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는  $P-V$  곡

\* 주저자 : 순천대학교 박사과정

\*\* 교신저자 : 순천대학교 전기제어공학과

Tel : 061-750-3543, Fax : 061-752-1103

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

접수일자 : 2012년 1월 27일

1차심사 : 2012년 2월 16일

심사완료 : 2012년 7월 16일

선에서 전력의 기울기를 이용하여 4개의 구간으로 나누고 동작점이 최대전력점에서 먼 곳에 있을 경우에는 추적속도를 개선하기 위해 최대 스텝크기를 사용하고 최대전력점에 가운 곳에 있을 경우에는 정확도 개선을 위해  $P-V$  곡선의 기울기 값에 따라서 스텝 크기를 조절하는 가변 IC 방식을 제시한다. 본 논문에서 제시한 방식은 종래의 PO 및 IC 방식과 비교를 통해 타당성을 입증한다.

## 2. 태양전지 모델링

그림 1은 태양전지의 등가회로를 나타내며, 태양전지의 출력전류에 대한 식은 다음 등가회로를 기반으로 식 (1)~(2)와 같이 나타낼 수 있다.

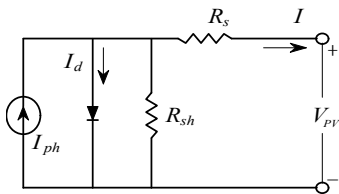


그림 1. 태양전지의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of solar cell

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

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

광전류  $I_{ph}$ 는 일사량과 온도에 따라 변화되며 다음 식과 같다.

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

여기서  $S$ 는 일사량,  $S_{ref}$ 는 기준 일사량,  $S_N$ 은 단위 일사량,  $I$ 는 PV 모듈 전류,  $I_{o,ref}$ 는 STC (Standard Test Condition)에서 다이오드 역 포화전류,  $I_t$ 는 단락 전류 온도계수[A/K],  $I_d$ 는 다이오드 전류,  $R_s$ 는 직렬 저항,  $R_{sh}$ 는 병렬저항,  $I_o$ 는 역 포화 전류,  $T_c$ 는 태양

전지 온도[K],  $T_r$ 은 태양전지 기준온도[K],  $A, B$ 는 제조상수,  $E_g$ 는 에너지 밴드 갭[eV],  $q$ 는 쿨롱 상수( $1.60218 \times 10^{-19}$ )[C]와  $k$ 는 볼츠만 상수( $1.38066 \times 10^{-23}$ )[J/K]를 의미한다.

다이오드 전류를 쇼클리 방정식에 의해서 정리하면 다음 식과 같다[7-8].

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

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

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

$$I = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{q(V_{PV} + IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

## 3. MPPT 제어 알고리즘

### 3.1 IC MPPT 제어 알고리즘

IC MPPT 방식은 태양전지의  $P-V$  출력곡선의 기울기를 이용하는 방식으로 그 특성이 안정적이고, 구현방식이 간단하다. 그림 2는 IC MPPT의 제어 원리를 나타낸다. IC MPPT는 그림 2의  $P-V$  특성곡선에서 MPP에서  $P-V$  특성곡선의 기울기가 0이라는 것을 이용하여 최대전력점을 찾는 방식이다.

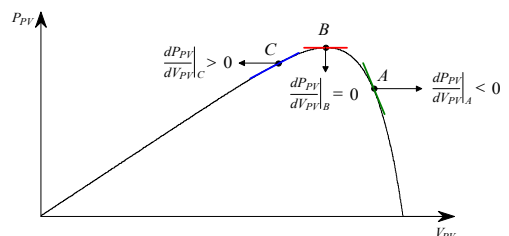


그림 2. IC MPPT의 제어 원리  
Fig. 2. Control theory of IC MPPT

태양전지의  $P-V$  출력곡선의 기울기는  $dP_{PV}/dV_{PV}$ 로 나타낼 수 있다. 그림 2에서 최대전력점은 B점에 위치하고 있으며, 이때의 기울기는 0이다. 최대전력점을 기준으로 왼쪽은 양의 기울기를 가지고, 오른쪽은 음의 기울기를 가지고 있음을 알 수 있다.

IC의 기울기인  $dP_{PV}/dV_{PV}$ 를 전압과 전류의 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (7)$$

식 (7)을 위의 그림 2에 적용하면 A점, B점, 그리고 C점에서 다음 식 (8)~(10)과 같이 나타난다.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad (\text{at Point A}) \quad (8)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (\text{at Point B}) \quad (9)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad (\text{at Point C}) \quad (10)$$

위의 식 (8)~(10)을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (\text{at MPP}) \quad (11)$$

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad (\text{left of MPP}) \quad (12)$$

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad (\text{right of MPP}) \quad (13)$$

즉 식 (11)~(13)의 부호에 의해서 현재 동작점의 위치를 판별할 수 있다.

### 3.2 가변 IC MPPT 제어 알고리즘

총래의 고정된 스텝 크기를 가지는 MPPT 방식은

스텝 크기에 따라서 MPPT 성능이 좌우된다. 큰 스텝 크기는 추적속도는 향상되지만 추적의 정확도가 낮아지며 작은 스텝 크기는 추적의 정확도는 높지만 추적속도가 느려지는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 고정된 스텝 크기를 가진 MPPT 방식의 문제점을 해결하기 위하여 가변 IC MPPT 방식을 제시한다. 스텝 크기는 PV 어레이의  $dP_{PV}/dV_{PV}$ 에 따라 자동으로 조절되고 스텝 크기는 최대전력점 부근에서  $dP_{PV}/dV_{PV}$ 가 작아지기 때문에 아주 작은 값을 가지게 된다. 따라서 가변 IC MPPT는 정상상태에서 매우 양호한 정확도를 가진다. 그러나 가변 스텝 크기가 최대전력점에 접근할수록 작아지기 때문에 정상상태에서의 정확도는 개선할 수 있으나 추적속도는 최대전력점에 접근할수록 늦어지는 단점을 가진다. 본 논문에서는 가변 IC MPPT 방식에서 추적속도를 더욱더 개선하기 위하여 기울기와 전력의 곱을 이용하여 최대전력점을 추적하는 4개의 구간으로 나눈다. 그림 3은 본 논문에서 제시한 가변 IC MPPT 방식의 4개 구간을 나타낸다.

그림 3에서 첫 번째 그래프는 태양전지의  $P-V$  곡선을 나타내고 두 번째 그래프는  $|dP_{pv}/dV_{pv}|$ , 세 번째 그래프는 전력과 기울기의 곱의 그래프이다.

$P-V$ 곡선의 기울기와 전력의 곱을 나타내는  $PS$ 는 다음과 같다.

$$PS = P_{pv}^n \times \left| \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \right| \quad (14)$$

그림 3에서 4가지 모드는 IC의 기울기와  $PS$ 의 기울기에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\text{Mode I : } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \quad \& \quad \frac{dPS}{dV_{pv}} > 0 \quad (15)$$

$$\text{Mode II : } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \quad \& \quad \frac{dPS}{dV_{pv}} < 0 \quad (16)$$

$$\text{Mode III : } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \quad \& \quad \frac{dPS}{dV_{pv}} > 0 \quad (17)$$

$$\text{Mode IV : } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \quad \& \quad \frac{dPS}{dV_{pv}} < 0 \quad (18)$$

가변 IC 방법을 이용한 태양광 발전의 MPPT 제어

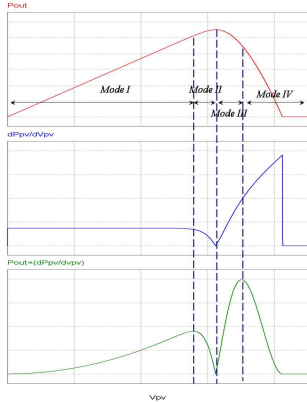


그림 3. 태양전지 모듈의 특성곡선  
Fig. 3. Characteristics of PV Module

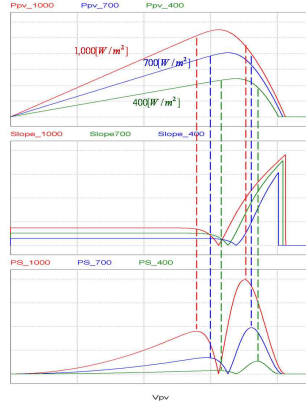


그림 4. 일사량에 따른 PV모듈의 특성곡선  
Fig. 4. Characteristic curve of PV module with radiation

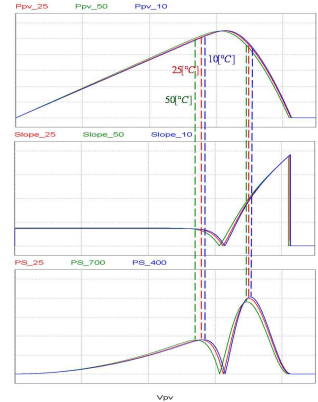


그림 5. 온도에 따른 PV모듈의 특성곡선  
Fig. 5. Characteristic curve of PV module with temperature

모드 I과 IV는 최대전력점과 최대전력점에서 멀리 떨어져 있기 때문에 이 영역에서는 빠르게 변화하기 위하여 스텝 크기를 최대값을 사용하고 모드 II와 III는 최대전력점 부근에 있기 때문에 최대전력점의 정확도 향상을 위해 가변 스텝을 사용한다.

모드 II와 III에 사용되는 가변 스텝 크기는 다음과 같다.

$$C_p = C_{p_{max}} \times \left| \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \right| \quad (19)$$

그림 4는 일사량 변화에 따른 PV 모듈의 특성곡선을 나타내고 그림 5는 온도 변화에 따른 PV 모듈의 특성곡선을 나타낸다. 일사량 및 온도가 변화하여도 기울기와 전력의 곱인 PS가 두 개의 쌍곡선 형태로 나타나 제어의 모드를 결정할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제시한 가변 IC MPPT 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

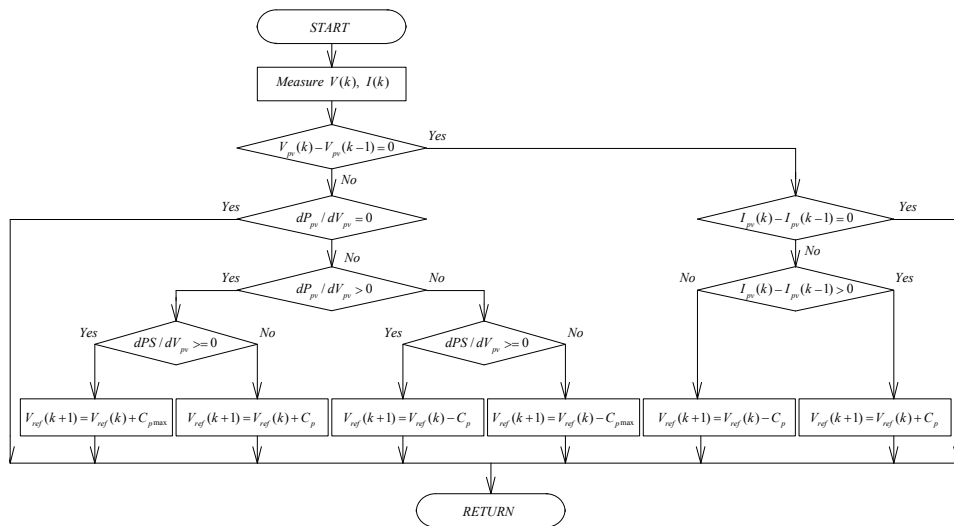


그림 6. 가변 IC MPPT 알고리즘 순서도  
Fig. 6. Flow chart of variable IC MPPT algorithm

### 4. 성능시험 및 결과

MPPT 제어를 위한 각각의 알고리즘에 대한 성능분석을 위한 PSIM 회로도는 그림 7과 같다. 표 1은 MPPT 제어의 성능분석을 위한 PV 모듈의 파라미터를 나타낸다. PV 모듈의 파라미터는 AM 1.5, 온도 25 [°C] 및 일사량 1,000[W/m<sup>2</sup>]의 실험조건에서 측정된 값을 나타낸다. PSIM 회로도는 PV모듈, PV모듈의 일사량 조절을 위한 일사량 조절부, MPPT 제어수행을 위한 MPPT 제어부, 전압 조절을 위한 DC-DC 컨버터 부로 구성되어 있다.

그림 8은 일사량이 1,000[W/m<sup>2</sup>]→700[W/m<sup>2</sup>]→1,000[W/m<sup>2</sup>]으로 변화했을 때 MPPT 제어의 응답특성을 나타낸다. 그림 8 (a)는 PO 방식, 그림 8 (b)는 IC 방식, 그림 8 (c)는 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식의 출력전력을 나타낸다.

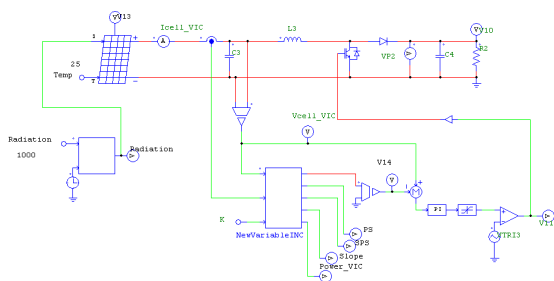
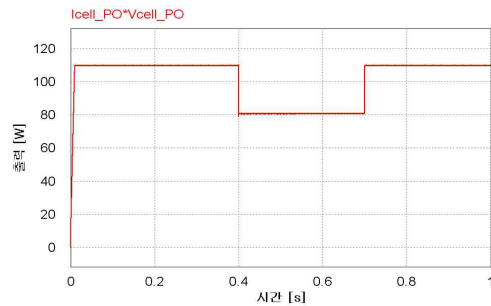


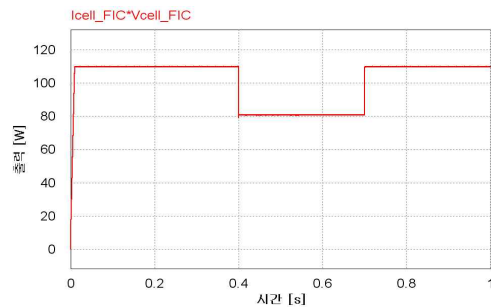
그림 7. MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도  
Fig. 7. PSIM circuit for MPPT control

표 1. PV모듈의 파라미터  
Table 1. Parameter PV module

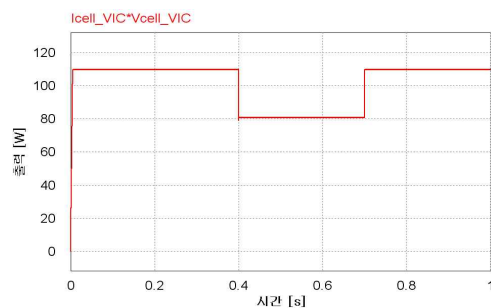
파라미터	기호	측정값	단위
개방전압	$V_{oc}$	41.2	[V <sub>dc</sub> ]
단락전류	$I_{sc}$	3.69	[A]
최대전력 전압	$V_{mp}$	32.9	[V <sub>dc</sub> ]
최대전력 전류	$I_{mp}$	3.34	[A]
최대전력	$P_{mp}$	110	[W]



(a) PO 방식



(b) IC 방식



(c) 가변 IC 방식

그림 8. 일사량 변동에 대한 MPPT 제어의 응답특성  
Fig. 8. Response characteristics of MPPT control with radiation changing

표 2. 그림 5.14에 대한 응답특성  
Table 2. Response characteristics of Fig. 5.14

구분	Settling Time	Maximum Error
PO	0.0105 [sec]	0.38 [W]
IC	0.0102 [sec]	0.21 [W]
가변 IC	0.0057 [sec]	0.11 [W]

그림 9는 그림 8의 일사량이 0[W/m<sup>2</sup>]→1,000[W/m<sup>2</sup>]으로 변동하였을 때 응답특성을 확대한 그림을 나타

낸다. 그림 9 (a)는 PO 방식, 그림 9 (b)는 IC 방식, 그림 9 (c)는 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식의 응답특성을 나타낸다. 표 2는 정량적인 성능을 나타낸다. 본 가변 IC 방식은 종래의 PO와 IC 방식 보다 추적속도가 빠르고 정상상태 오차가 작게 나타난다.

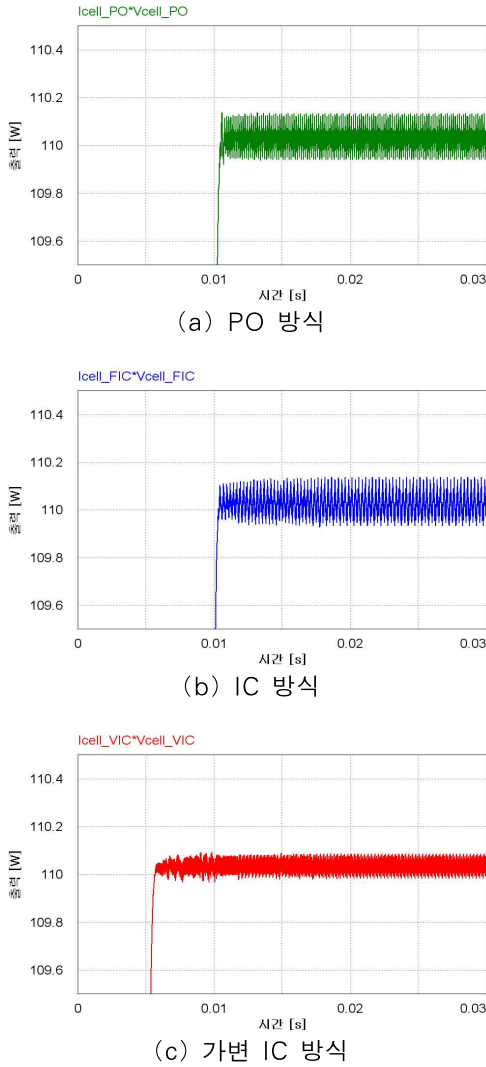


그림 9. 일사량 변동에 대한 MPPT 제어의 응답특성 비교 (0[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$ 1,000[W/m<sup>2</sup>])  
 Fig. 9. Comparison of response characteristics of MPPT control with radiation changing (0[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$ 1,000[W/m<sup>2</sup>])

그림 10은 일사량이 1,000[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$ 700[W/m<sup>2</sup>]로 변화했을 때 MPPT 제어 방식에 따른 응답특성 비교를

나타낸다. 그림 10 (a)는 PO 방식, 그림 10 (b)는 IC 방식, 그림 10 (c)는 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식의 응답특성을 나타낸다. 정상상태 도달 시간은 PO 방식이  $6.9 \times 10^{-4}$ [sec], IC MPPT방식이  $6.13 \times 10^{-4}$ [sec], 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식이  $3.2 \times 10^{-4}$ [sec]로 본 논문에서 제시한 방식의 추적속도가 가장 빠르게 나타났다.

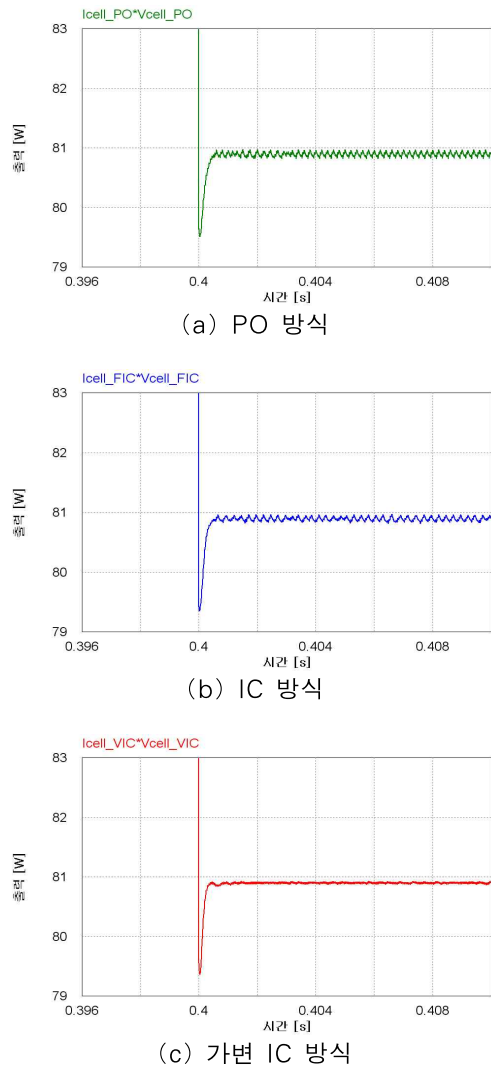
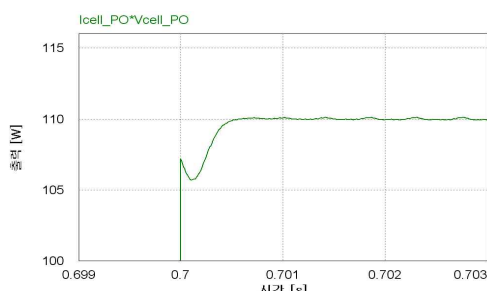
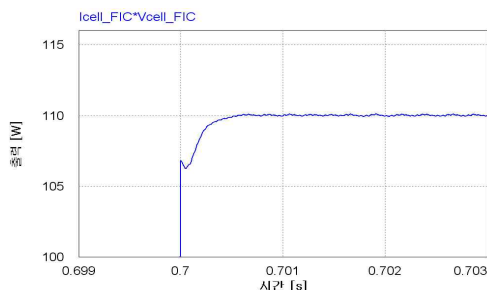


그림 10. 일사량 변동에 대한 MPPT 제어의 응답특성 비교 (1,000[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$ 700[W/m<sup>2</sup>])  
 Fig. 10. Comparison of response characteristics of MPPT control with radiation changing (1,000[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$ 700[W/m<sup>2</sup>])

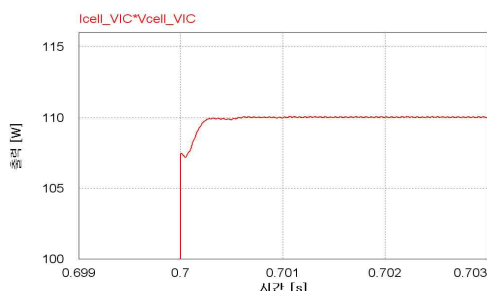
그림 11은 일사량이  $700[\text{W}/\text{m}^2] \rightarrow 1,000[\text{W}/\text{m}^2]$  으로 변화하였을 때 응답특성 비교를 나타낸다. 그림 11 (a)는 PO 방식, 그림 11 (b)는 IC 방식, 그림 11 (c)는 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식의 응답특성을 나타낸다. 정상상태 도달시간은 PO 방식이  $5.1 \times 10^{-4}[\text{sec}]$ , IC 제어방식이  $6.2 \times 10^{-4}[\text{sec}]$ , 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식이  $2.6 \times 10^{-4}[\text{sec}]$ 로 나타났다. 본 논문에서 제시한 방식의 추적속도가 가장 빠르게 나타났다.



(a) PO 방식



(b) IC 방식



(c) 가변 IC 방식

그림 11. 일사량 변동에 대한 MPPT 제어의 응답특성 비교 ( $700[\text{W}/\text{m}^2] \rightarrow 1,000[\text{W}/\text{m}^2]$ )

Fig. 11. Comparison of response characteristics of MPPT control with radiation changing ( $700[\text{W}/\text{m}^2] \rightarrow 1,000[\text{W}/\text{m}^2]$ )

## 4. 결 론

본 논문은 태양광 발전시스템의 MPPT 제어를 위한 가변 IC 방식을 제시한다. 태양광 발전의 효율을 향상시키기 위하여 일반적으로 MPPT 제어방식을 사용한다. 이러한 MPPT 제어의 대표적인 방식으로는 PO 및 IC 방식이 있다. 그러나 종래의 PO 및 IC 방식은 고정된 스텝 크기를 이용하여 최대전력점을 추적하기 때문에 스텝 크기에 따라서 MPPT 성능이 좌우된다. 스텝 크기는 크기가 클 경우 추적속도는 개선되지만 정확도가 낮아지는 문제가 있으며 크기가 작을 경우에는 추적의 정확도는 개선되지만 추적속도가 느려지는 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 태양광 발전시스템의  $P-V$  곡선의 기울기를 이용하여 스텝 크기를 자동으로 조절하는 가변 IC 방식을 제시한다. 그러나 기울기를 통해 스텝 크기를 조절하였을 경우에 최대전력점에 가까워질수록 그 크기가 작아져 추적속도가 점점 느려지는 단점을 가진다. 따라서  $P-V$  곡선의 기울기와 전력의 곱을 이용하여 MPPT 제어를 4개의 구간으로 나누어 제어를 수행한다. 최대전력점에서 먼 곳에 있는 구간에서는 최대의 스텝값을 사용하여 추적속도를 향상시키고 최대전력점에 가까운 곳에 있는 구간에서는 가변스텝을 사용하여 정확도를 개선한다. 본 논문에서 제시한 방식은 일사량 변동에 대하여 종래의 PO 및 IC 방식과 비교 분석한다. 본 논문에서 제시한 가변 IC 방식은 종래의 방식에 비하여 과도상태에서 상승속도가 빠르게 나타났으며 정상상태에서는 오차가 작게 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 방식의 타당성을 입증하였다.

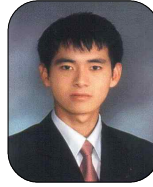
이 논문은 한국조명·전기설비학회 2011년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

## References

- [1] K. Kurokawa, "Energy from Desert", 2003.
- [2] C. J. Winter, R. L. Sizmann, L. L. Van-Hull, "Solar Power Plants", Springer-Verlag, 1991.

- [3] J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, "Comparison study of Maximum Power Point Tracking Control with Changing of Radiation", journal of KIEE, Vol. 9, no. 6, pp. 1011-1085, 2010.
- [4] J. S. Choi, "Development of High Performance MIC system for AC module with Photovoltaic Generation", graduate school of suncheon Univ, 2010.
- [5] N. Femia, G. Petron, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, no. 4, pp. 963-973, 2005.
- [6] J. A. Abu-Qahouq, H. Mao, H. J. Al-Atrash, and I. Batarseh, "Maximum efficiency point tracking (MEPT) method and digital dead time control implementation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 21, no. 5, pp. 1273-1281, 2006.
- [7] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis and N. C. Voulgaris., "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE Trans. Power Electronics., vol. 16, pp.46-54, 2001.
- [8] Y.C. Kuo, T. J. Liang, J. F. Chen., "Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic energy conversion system", IEEE Trans. Ind. Electronics., vol. 48, pp.594-601, 2001.

◇ 저자소개 ◇



**고재섭 (高在涉)**

1980년 2월 2일생. 2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업 2007년 2월 순천대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업. 2007년 3월~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (061)750-3540

Fax : (061)752-1103

E-mail : kokos22@scnu.ac.kr



**정동화 (鄭東和)**

1955년 8월 15일생. 1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수.

Tel : (061)750-3543

Fax : (061)752-9841

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr