

FVSS-PO를 이용한 태양광 발전시스템의 MPPT 제어

(The MPPT Control on Photovoltaic System using FVSS-PO Method)

고재섭* · 정동화**

(Jae-Sub Ko · Dong-Hwa Chung)

Abstract

This paper proposes the maximum power point tracking(MPPT) control of photovoltaic system using fuzzy based variable step size perturbation & observation(FVSS-PO) method. Conventional PO and incremental conductance(IC)MPPT control algorithm generally uses fixed step size. A small fixed step size will cause the tracking speed to decrease and tracking accuracy of the MPP will decrease due to large fixed step size. Therefore, the fixed step size can't be satisfying both the tracking speed and the tracking accuracy. This paper proposes FVSS-PO MPPT algorithm that adjusts automatically step size of PO by fuzzy control according to operating conditions. The validity of MPPT algorithm proposed in this paper prove through compare with conventional PO MPPT algorithm.

Key Words : Photovoltaic, MPPT, Fuzzy Control, Step Size, Variable Step Size

1. 서 론

태양에너지는 친환경적이고 무한한 에너지원이며 또한 태양광 발전 시스템은 발전을 위한 별도의 구동부가 필요없고 소음이 없으며 유지비가 적게 든다는 장점을 가지고 있다. 이러한 태양광 발전 시스템의 효

율을 높이기 위하여 셀 자체의 효율 및 전력변환장치의 효율을 개선하는 방법, 태양의 위치를 추적하는 방법 및 태양광 발전시스템이 항상 최대전력점에서 운전하도록 하는 MPPT 제어 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[1-2].

태양광 발전시스템의 최대전력점을 추적하는 MPPT 제어의 대표적인 방법으로는 PO 와 IC 방법이 있으며 고정된 스텝 크기를 이용하여 최대전력점을 추적한다[3-4]. 고정된 스텝은 크기에 따라서 스텝 크기가 큰 경우 추적속도는 빨라지지만 추적의 정확도가 낮아지며 스텝 크기가 작은 경우 추적의 정확도는 높아지는 반면 추적속도가 느려지는 단점을 가진다. 따라서 고정된 스텝 크기로 실시간으로 변화하는 일사량 및 온도에 대해 과도상태 및 정상상태 모두를 만족할 만한 성능을 기대하기는 어렵다.

* 주저자 : 순천대학교 공학박사
** 교신저자 : 순천대학교 전기제어공학과
* Main author : Suncheon National Univ. Doctor of Engineering
** Corresponding author : Suncheon National Univ. Department of Electric Control Engineering
Tel : 061-750-3543, Fax : 061-752-1103
E-mail : hwa777@suncheon.ac.kr
접수일자 : 2012년 12월 7일
1차심사 : 2012년 12월 13일, 2차심사 : 2013년 3월 7일
심사완료 : 2013년 9월 27일

퍼지제어는 정량적으로 표현하기 힘든 전문가의 경험적 지식을 소속함수와 퍼지 규칙 베이스의 형태로 구성하여 복잡한 수학적 모델링을 정확하게 알지 못해도 접근이 용이하며, 다른 비선형 시스템에 비해 쉽게 다룰 수 있는 장점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 종래의 고정된 스텝 크기를 가지는 MPPT 방법의 문제점을 해결하기 위하여 퍼지제어를 통해 동작상태에 따라 스텝 크기를 조절하는 FVSS-PO (Fuzzy Variable Step Size - Perturbation & Observation) 방법을 제시한다. 본 논문을 통해 제시된 MPPT 방법은 종래의 방법과 다양한 환경조건에 대해 과도상태 및 정상상태에서 응답 특성을 비교하여 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.

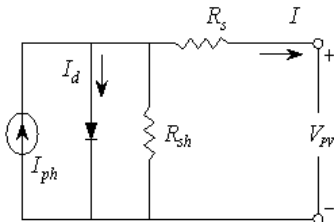


그림 1. 태양전지의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of solar cell

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

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

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

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

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_i 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 (1.60218×10^{-19})[C]와 k 는 볼츠만 상수 (1.38066×10^{-23})[J/K]를 의미한다.

다이오드 전류를 쇼클리 방정식에 의해서 정리하면 다음 식과 같다[5-6].

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

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

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. 종래의 MPPT 알고리즘

3.1 PO 방법

PO(Perturbation and Observation) MPPT의 제어 원리는 태양전지의 동작점을 규정하는 태양전지 출력 단 전압(V_{pv}) 제어 시에 전압을 일정한 폭으로 변동시킨 후 태양전지 출력전력($P_{pv}[n]$)을 관측하고, 이를 이전 출력전력($P_{pv}[n-1]$)과 비교하여 출력이 증가하는 방향으로 전압(V_{pv}^*)을 상승 또는 하강시킴으로써 최대전력점을 추종하는 방식이다. 이 방식을 간단히 요

약하면 표 1과 같다.

표 1. PO MPPT의 동작상태
Table 1. Operating state of PO MPPT

Cas e	Perturbation $[\Delta V_{ref}(k)]$	Change in Power $[\Delta P(k)]$	Next Perturbation $[C_p]$
1	Positive	Positive	Positive
2	Positive	Negative	Negative
3	Negative	Positive	Negative
4	Negative	Negative	Positive

이와 같이 ΔV_{PV} 와 ΔP_{PV} 의 극성에 따라 다음 기준전압을 결정하는 방법이 PO 방식이며, 위의 동작 특성에 따라 PO MPPT를 순서도로 나타내면 다음 그림 2와 같다[7-8].

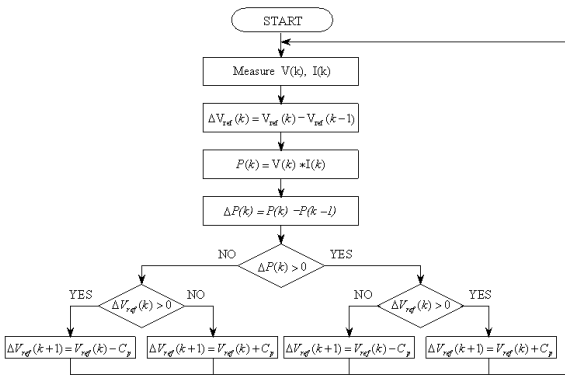


그림 2. PO MPPT의 순서도
Fig. 2. Flowchart of PO MPPT

3.2 IC 방법

IC(Incremental Conductance) MPPT 방식은 태양전지의 $P-V$ 출력곡선의 기울기를 이용하는 방식으로 그 특성이 안정적이고, 구현방법이 간단하여 PO 방식과 함께 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방법 중 하나이다. 그림 3은 IC MPPT의 제어 원리를 나타내고 있다. IC MPPT는 그림 8의 $P-V$ 특성곡선에서 보는 바와 같이 MPP에서 $P-V$ 특성곡선의 기울기가 0(Zero)라는 것을 이용하여 최대전력점을 찾는 방식이다. 태양전지의 $P-V$ 출력곡선의 기울기는

dP_{PV}/dV_{PV} 로 나타낼 수 있다. 그림 3에서 최대전력점은 B점에 위치하고 있으며, 이때의 기울기는 0이다. 최대전력점을 기준으로 왼쪽은 양의 기울기를 가지고, 오른쪽은 음의 기울기를 가지고 있음을 알 수 있다.

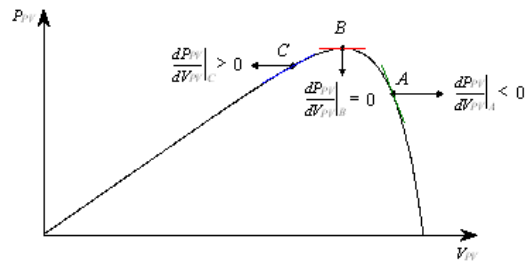


그림 3. IC MPPT의 제어 원리
Fig. 3. Control theory of IC MPPT

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 (8)을 위의 그림 8에 적용하면 A점, B점, 그리고 C점에서 다음 식 (9)~식 (11)과 같이 나타난다.

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

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

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

IC MPPT의 동작을 순서도로 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서 알 수 있듯이 IC 제어방식은 전압 기준치(V_{PV}^*)를 ΔV 만큼 변동시켜서 최대전력점을 추종하는 방식에 있어 PO 방식과 같이 ΔV 의 크기에 따라 그 추종속도 및 자려 진동의 폭이 결정된다. 또한 전압센서와 전류센서가 모두 요구된다는 단점 역시 존재한다[7-8].

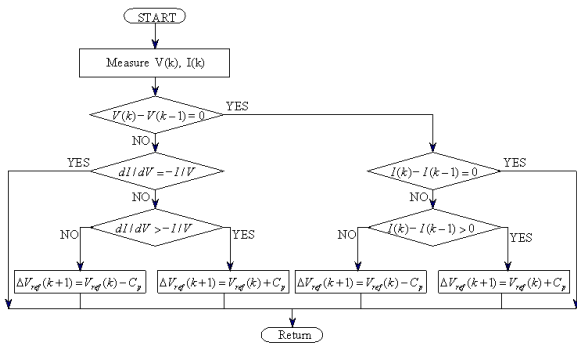


그림 4. IC MPPT 제어의 순서도
Fig. 4. Flowchart of IC MPPT control

4. FVSS-PO MPPT 제어

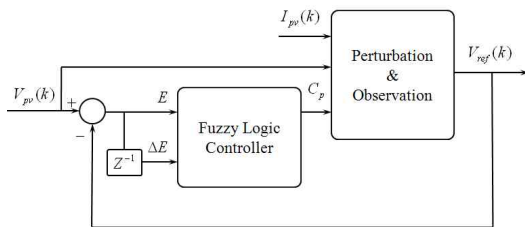


그림 5. FVSS-PO 제어기
Fig. 5. FVSS-PO Controller

표 2. 퍼지 룰베이스
Table 2. Fuzzy Rule base

e ce	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

여기에서 NL : Negative Large, NM : Negative Medium, NS : Negative Small, ZE : Zero, PS : Positive Small, PB : Positive Big를 나타낸다.

그림 5는 본 논문에서 제시한 FVSS-PO를 나타낸다. PV 모듈로부터 전압을 입력받아 전압과 PO의 출력전압을 비교하여 그 오차값(E)과 오차의 변화값

(ΔE)을 퍼지제어기의 입력으로 하여 PO의 스텝 크기인 C_p 를 출력한다. 표 2는 퍼지제어에 사용된 퍼지 룰베이스를 나타내고 오차값과 오차의 변화값은 다음과 같다.

$$E = V_{ref}(k) - V_{pv}(k) \quad (11)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad (12)$$

그림 6, 7은 각각 입력과 출력에 대한 퍼지 멤버십 함수를 나타내고 그림 8은 본 논문에서 제시한 MPPT 제어를 위한 전체시스템 구성도를 나타낸다.

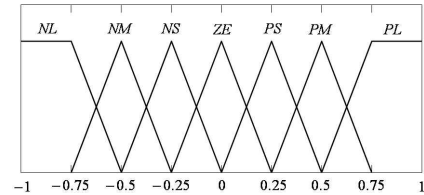


그림 6. 입력에 대한 멤버십 함수
Fig. 6. Input membership function

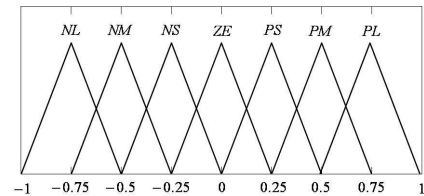


그림 7. 출력에 대한 멤버십 함수
Fig. 7. Output membership function

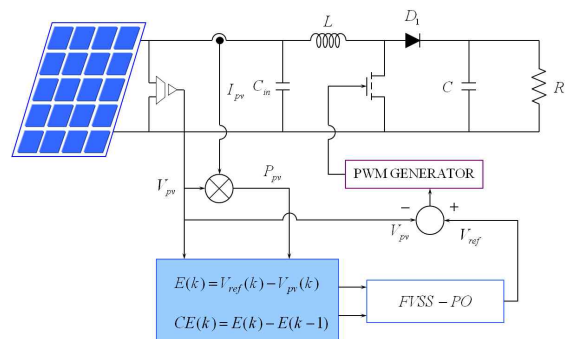


그림 8. HBPI 제어기에 의한 MPPT 제어시스템
Fig. 8. MPPT control system by HBPI controller

FVSS-PO 제어기로 MPPT 제어를 위한 기준전압을 출력하고 PWM 발생기로 Buck 컨버터의 듀티비를 조절하여 MPPT를 수행한다.

5. 시스템 성능결과

본 논문에서 제시한 FVSS-PO 제어기의 성능분석을 위한 PSIM 회로도에는 그림 9와 같다. 표 3은 MPPT 제어의 성능분석을 위한 PV 모듈의 파라미터를 나타낸다. PV 모듈의 파라미터는 AM 1.5, 온도 25[°C] 및 일사량 1,000[W/m²]의 실험조건에서 측정된 값을 나타낸다.

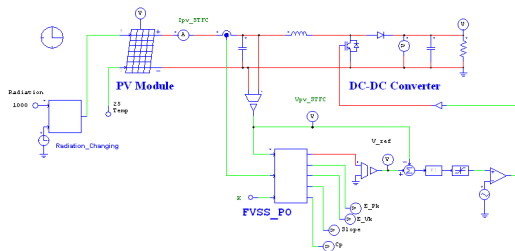


그림 9. MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도
Fig. 9. PSIM circuit for MPPT control

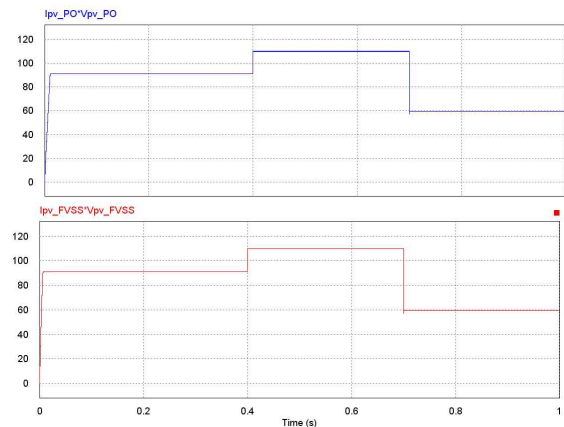
표 3. PV모듈의 파라미터 및 시뮬레이션 조건
Table 3. Parameter PV module and simulation condition

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

그림 10은 일사량이 800[W/m²]→1000[W/m²]→700[W/m²]로 변화했을 때 본 논문에서 제시한 FVSS-PO 방법과 종래의 PO 방법의 출력전력을 나타낸다.

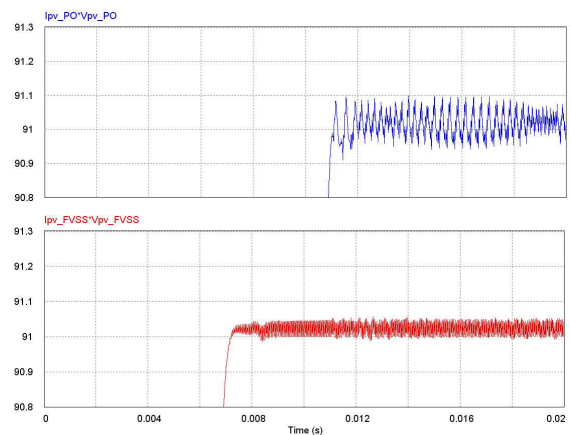
그림 11, 12는 그림 10에서 과도상태 및 정상상

태의 응답특성의 명확한 분석을 위해 확대한 그림을 나타낸다. 그림 11에서 정상상태에 도달하는 시간이 FVSS-PO 방법은 0.0072[sec], PO 방법은 0.011[sec]로 본 논문에서 제시한 FVSS-PO 방법이 종래의 PO 방법에 비하여 매우 빠르게 나타났다. 그림 12의 정상상태 오차 역시 본 논문에서 제시한 FVSS-PO 방법이 종래의 PO 방법에 비하여 현저하게 작게 나타났다.



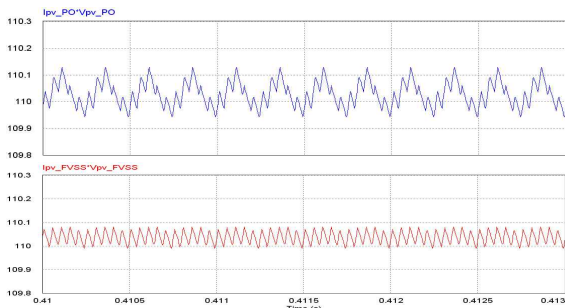
상 : PO, 하 : FVSS-PO

그림 10. 일사량 변화에 대한 출력전력
Fig. 10. Output power with radiation changing

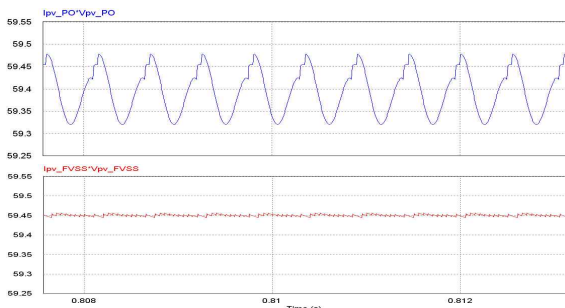


상 : PO, 하 : FVSS-PO

그림 11. 과도상태에 대한 MPPT 응답특성 비교
Fig. 11. Comparison of MPPT response characteristic in transient-state



(a) 1,000W/m²



(b) 700W/m²

상 : PO, 하 : FVSS-PO

그림 12. 정상상태에 대한 MPPT 응답특성 비교
Fig. 12. Comparison of MPPT response characteristic in steady-state

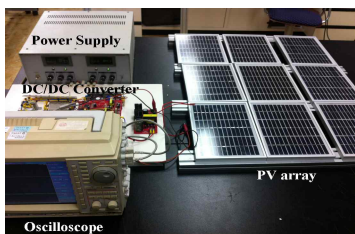


그림 13. 태양광 발전시스템 실험장치
Fig. 13. Experiment device of PV system

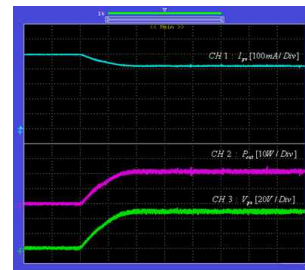
그림 13은 본 논문에서 사용된 실험세트를 나타낸다. 실험세트는 PV 모듈 WSM-4W5V 9장을 이용하여 PV 어레이를 구성하였고 TMS320LF2406으로 구성된 DC-DC컨버터, 과형측정을 위한 YOKOGAWA DL708E 오실로스코프와 GP 4505DU Power Supply로 구성되어 있다.

그림 14는 MPPT 제어의 응답특성을 나타낸다. 그림 14 (a)는 PO 방법, 그림 14 (b)는 본 논문에서 제시

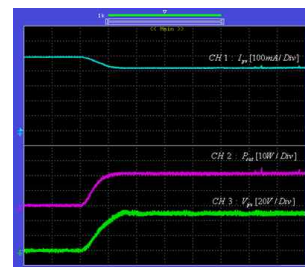
한 FVSS-PO방법의 응답특성을 나타낸다. 각각의 응답특성에서 CH1은 PV 어레이의 전류로 100[mA/Div], CH2는 출력전력으로 10[W/Div], CH3은 PV 어레이의 전압으로 20[V/Div]를 나타내며 시간은 500[ms/Div]를 나타낸다. 표 4는 각각의 응답특성에 대한 과도상태 비교를 나타내며 본 논문에서 제시한 방법에 안정화 시간이 가장 빠르게 나타난다.

표 4. MPPT 제어의 과도상태 응답특성 비교
Table 4. Comparison of response characteristics for MPPT control in transient-state

	PO	FVSS-PO
Settling Time	0.82[sec]	0.59[sec]



(a) PO

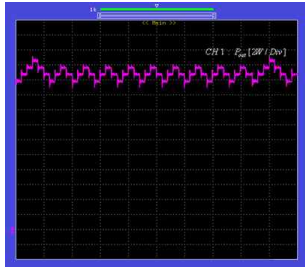


(b) FVSS-PO

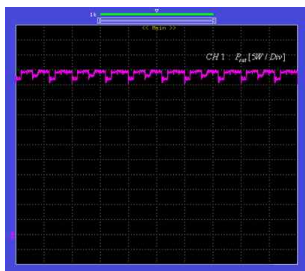
그림 14. MPPT 제어에 대한 응답특성 비교
Fig. 14. Comparison of response characteristics for MPPT control

그림 15는 그림 14의 MPPT 제어에 따른 정상상태를 확대한 응답특성을 나타낸다. 그림 15 (a)는 PO 방법, 그림 15 (c)는 본 논문에서 제시한 지능형 MPPT 제어의 응답특성을 나타내며 CH1은 출력전력으로 2[W/Div]를 나타내고 시간은 20[ms/Div]를 나타낸다. 본 논문에서 제시한 FVSS-PO 방법이 종래의 PO 방

법에 비하여 오차가 작게 나타나고 있다.



(a) PO



(b) FVSS-PO

그림 15. MPPT 제어에 대한 응답특성 비교(정상상태 확대)

Fig. 15. Comparison of response characteristics for MPPT control(Expansion of steady-state)

6. 결 론

본 논문에서는 퍼지제어를 기반으로 하는 FVSS-PO 방법을 이용한 태양광 발전의 MPPT 제어를 제시한다. 종래의 PO MPPT 방법은 고정된 스텝 크기로 인하여 과도상태와 정상상태의 응답특성을 모두 만족시키는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 퍼지제어를 이용하여 태양광 발전시스템의 동작상태에 따라서 PO 방법의 스텝크기를 변화시키는 FVSS-PO 방법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 FVSS-PO 방법은 종래의 고정된 스텝크기를 가진 PO 방법과 일사량 변동에 대한 응답특성 비교하였으며, 본 논문에서 제시한 방법이 최대전력점 추적시간이 빠르게 나타났으며 정상상태에서 리플이 적어 최대전력점 추적 정확도도 높게 나타났다. 이로써 본 논문에서 제시한 FVSS-PO MPPT 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. S. Choi, J. S. Ko, "Development of Improved P&O Algorithm of PV system Considering Insolation variation", Journal of the KIIEE, vol. 24, no. 4, pp. 166-176, 2010.
- [8] J. S. Choi, D. H. Chung, "A Novel MPPT Control of PV MIC System Considering the shaded Effect", Journal of the KIIEE, vol. 26, no. 5, pp. 21-33 2012.

◆ 저자소개 ◆



고재섭(高在涉)

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

Tel : (061)750-3543

Fax : (061)752-1103

E-mail : kokos22@scnu.ac.kr



정동화(鄭東華)

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