

MPPT Control of Photovoltaic Generation Using MLPO Method

최 정 식* · 정 동 화†
(Jung-Sik Choi · Dong-Hwa Chung)

Abstract - In this paper, robust multi-level perturbation and observation (MLPO) maximum power point tracking (MPPT) control are presented of the environmental change including the solar radiation and temperature. Because the maximum power point of the Photovoltaic (PV) is changing according to the solar radiation and temperature, the technology which traces the maximum power point in order to increase the power efficiency is recognized as the very important part. The general requirement for the MPPT is that system is simple, the cost is inexpensive, the PV tracking function and output change are small. Conventional perturbation and observation (PO) method is a simple system but there is the disadvantage that an efficiency of system becomes low. In addition, the incremental conductance (IC) control is required expensive CPU because of a large of calculations. In order to solve this problem, in this paper, the MLPO MPPT control using the method diversifying the step size according to the environment condition is presented. The validity of the MLPO method presenting from this paper is proved through analyzing the solar power generation output error at the steady state.

Key Words : Photovoltaic, Irradiation, Temperature, MPPT, PO, IC, ML-PO, Output error

1. 서 론

앞으로 전개될 국내·외 에너지 환경은 새로운 도전과 변화를 예고하고 있다. 전 세계적으로는 석유자원의 고갈 및 고유가, 기후변화협약 발효에 따른 국제적인 새로운 환경 및 무역질서의 도래, 그리고 중국, 인도 등 거대 개도국의 에너지 수요 폭발 등이 가져올 엄청난 도전에 부딪히고 있다. 우리나라의 경우 현재 막대한 에너지 수입에 따른 무역 수지 악화의 해소와 함께 향후 지속적인 개발에 필요한 에너지원의 확보가 이미 오래 전부터 국가적인 문제로 대두되고 있는 실정이다. 또한 기후변화협약 및 세계적으로 추진되고 있는 환경규제와 관련된 규약은 제품생산에 있어서 온실가스 배출량을 최소화하도록 유도하고 있어 에너지 다소비국인 우리나라로서는 국가경쟁력 향상을 위해 환경 친화적인 새로운 에너지원의 독자적인 개발이 절실히 요구되고 있다. 기술개발 시 고부가가치 산업의 창출이 가능하지만 기술의 공공성이 높으며, 현재로서는 경제성이 취약하여 장기간의 기술개발이 요구되는 신·재생 에너지 기술은 선진국에서 국가적인 차원에서 추진되고 있다. 다양한 태양전지를 이용한

태양광발전은 주택의 지붕이나 건물의 외벽에 모듈을 설치하여 필요한 전기부하를 충당하고 과잉·부족분은 계통선과 연계하여 보충하는 분산형 발전방식에 가장 적합한 기술로 특히 주간의 첨두부하 해결에 최적의 기술로 인정받고 있다.

이러한 태양광발전은 태양전지의 전기적 특성과 부하조건 및 환경조건(일사량, 온도) 등에 따라 효율이 다르므로 태양전지의 발전효율을 높이기 위한 연구가 절실히 필요하다. PV(Photovoltaic)의 최대전력점은 일사량과 온도에 따라 변하기 때문에 출력 효율을 증가시키기 위해 최대 전력점에서 동작하도록 최대전력점을 추적하는 기술은 매우 중요한 부분으로 인식되고 있다. 최대전력점 추적을 위한 일반적인 요구사항은 시스템이 간단하고 가격이 저렴하며 PV 추적성능 및 출력 변동이 적은 것이다.

PV의 최대전력점은 일사량과 온도에 따라 변하기 때문에 출력 효율을 증가시키기 위해 최대전력점에서 동작하도록 최대전력점을 추적하는 제어는 매우 어렵다. 이를 위해 최대전력점 추적제어 기술, 고효율 에너지 변환 인버터 기술은 지속적인 연구가 진행되고 있다. 최대전력점 추적을 위한 일반적인 요구 사항은 시스템이 간단하고 가격이 저렴하며 PV 모듈에 비치는 일사량의 불평형에 대하여 최대출력을 얻는 방법이 제안되고 있다.[1-3] 태양전지의 특성은 변하지 않지만 최대출력 동작점이 변하기 때문에 최대출력을 얻도록 동작시키는 MPPT 제어방식은 정전압 제어방식과 비선형함수 계산방식[4], PO(Perturbation and Observation) 제어

* 정 회 원 : 전자부품연구원 연구원

† 교신저자, 펠로우회원 : 순천대 공대 전기공학과 정교수 · 공박
E-mail : hwa777@scnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 4월 13일

최종완료 : 2011년 8월 26일

방법[5], IC(Incremental Conductance) 제어방법[6][7] 등이 대표적이다. 그러나 일사량이 급변하는 경우에 MPP(Maximum Power Point)를 추적하지 못하고, 계산량이 많아 고성능 CPU가 요구되며 추적효율이 낮다는 단점이 있다.[8-11]

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 구현이 쉽고 간단한 Multi-Level PO 방법을 제시하였다. Multi-Level PO 방법은 전력의 오차에 따라 스텝 값을 변화시켜 온도나 일사량의 변화에 빠르게 추종할 수 있으며, 종래의 PO 방법에 기초하여 알고리즘의 구현이 매우 쉬운 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 종래의 PO와 IC MPPT 방법과 제시한 Multi-Level PO 방법의 MPP 추종 성능을 비교, 분석하여 제시한 알고리즘의 타당성을 입증한다.

2. 태양전지 모델링

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원(Constant Current Source)으로 구성되어 있지만 실제로는 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet)저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 을 고려해야 한다. 태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되며 광자 수는 지수 함수적으로 감소한다.[12][13]

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

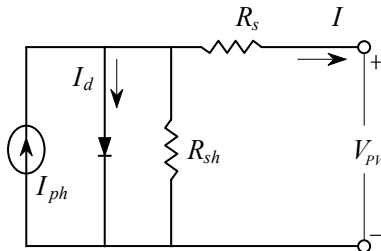


그림 1 태양전지의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of PV array

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

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

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

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

다이오드 전류를 쇼클리(Shockely) 방정식에 의해서 정리하면 다음 식과 같다.

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

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

식(2)에 식(4)을 대입하면 부하전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

병렬저항 R_{sh} 는 수백[Ω]에서 수[kΩ]이상의 상대적으로 아주 큰 값을 가지므로, 병렬저항을 무시하여 해당 선로를 개방상태로 간주할 수 있으며 식(2)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

일정 온도와 일사량 조건에서 태양전지의 $I-V$ 와 $P-V$ 특성곡선은 그림 2와 같이 나타난다.

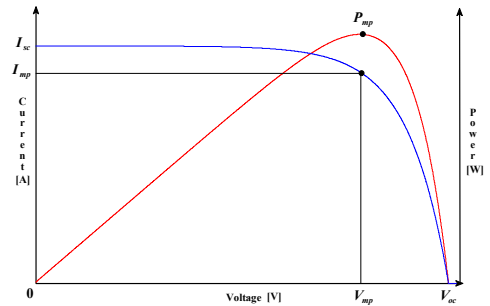


그림 2 태양전지의 $I-V$ 와 $P-V$ 특성곡선

Fig. 2 $I-V$ and $P-V$ characteristics of a PV array

또한, 개방전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , 및 충전률 FF(Fill Factor)등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련되는 파라미터이며, 식(7)에 $I=0$ 인 조건에서 다이오드 포화전류 I_o 에 의해서 결정되는 개방전압은 다음 식과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right] \quad (8)$$

단락전류 I_{sc} 는 $V_{PV}=0$ 인 조건으로부터 광전류 I_{ph} 와 일치하며, 온도의 변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음 식과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) \right] \quad (9)$$

태양전지에 연결된 부하저항의 크기를 조절함으로써 임의의 최적동작점에서 최대의 출력 P_{mp} 가 얻어지게 되며, 다음 식과 같다.

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (10)$$

부하저항에서 소비되는 에너지 P_{out} 는 다음 식과 같다.

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot \left[I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right) \right] \right] \quad (11)$$

최적부하조건에서 $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$ 이므로, 최적동작전압 V_{mp} , 최적동작전류 I_{mp} 는 다음 식과 같다.

$$V_{mp} = \exp\left(\frac{qV_{mp}}{nkT}\right) \left(1 + \frac{qV_{mp}}{nkT} \right) = \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \quad (12)$$

$$I_{mp} = \frac{(I_{sc} + I_0) \cdot \left(\frac{qV_{mp}}{nkT}\right)}{1 + \left(\frac{qV_{mp}}{nkT}\right)} \quad (13)$$

여기서 P_{mp} 가 커지기 위해서는 특성곡선에서 I_{mp} 와 V_{mp} 이 I_{sc} 와 V_{oc} 에 가까워야 한다. 여기서 충전률은 다음과 같다.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \\ \equiv \frac{V_{mp}}{V_{oc}} \left[1 - \frac{\exp\left(\frac{qV_{mp}}{nkt}\right) - 1}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkt}\right) - 1} \right] \quad (14)$$

변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광 에너지로 나눈 값으로 다음 식과 같다.

$$\eta_{PV} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \frac{FF \cdot V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (15)$$

식(2) ~ 식(6)을 이용하면 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며 그림 3은 태양전지 어레이의 PSIM 모델을 나타내었으며, 그림 4와 그림 5는 PSIM으로 구현한 태양전지 어레이의 모의실험 결과 파형으로 일사량과 온도변화에 대한 전류-전압 특성곡선을 보여주고 있다.

그림 2.6은 일사량에 따른 태양전지 출력의 변화를 보여주고 있으며 일사량의 변화 시 태양전지의 개방전압은 큰 변화

가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 2.7은 온도 변화에 따른 태양전지의 출력특성을 나타낸다. 일사량을 변화할 경우에 반해 온도를 변화시킬 경우에는 전류의 변화보다 전압의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

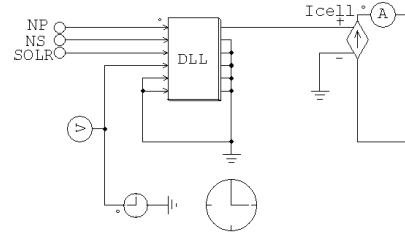


그림 3 태양전지 어레이의 PSIM 모델

Fig. 3 PSIM model of solar cell array

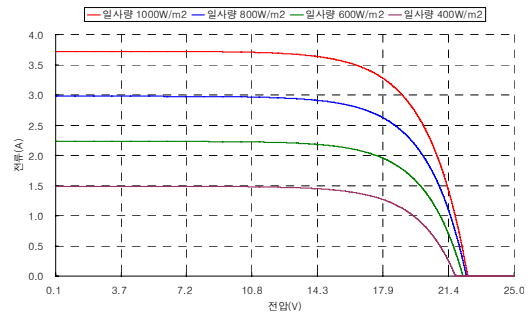


그림 4 일사량 변화에 대한 I-V 특성곡선

Fig. 4 I-V characteristic curve with radiation changing

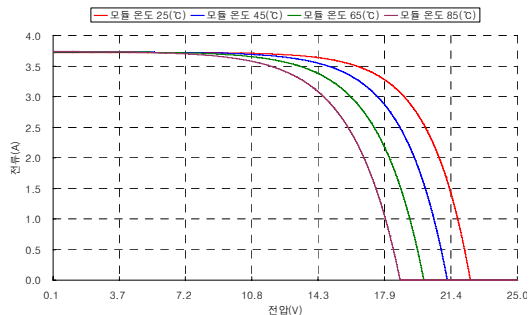


그림 5 온도 변화에 따른 I-V 특성곡선

Fig. 5 I-V characteristic curve with temperature changing

3. 종래의 MPPT 알고리즘

3.1 PO 방법

PO(Perturbation and Observation) MPPT의 제어 원리는 태양전지의 동작점을 규정하는 태양전지 출력단 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 요약하면 표 1과 같다.

표 1 PO MPPT의 동작상태

Table 1 Operating state of PO MPPT

Case	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

그림 6은 태양전지 어레이의 $P-V$ 출력 특성과 PO MPPT에 의한 동작점의 이동을 나타낸다. 그림 6에서 최초 동작점이 A인 경우, 태양전지 어레이 전압은 V_A 이고, 이때의 태양전지 출력전력은 P_A 이다. 다음 기준전압을 V_B 라고 하면, 이때의 출력전력은 P_B 이고, 동작점은 B점에 위치하게 된다. 여기서 $P_B > P_A$ 이고 $V_B < V_A$ 이므로, $\Delta P_{PV} > 0$ 이고 $\Delta V_{PV} < 0$ 가 되어 표 1의 Case 3이 된다. 즉, 다음 기준전압은 V_B 보다 ΔV 만큼 작은 V_C 가 된다. 동작점이 C로 움직인 경우 역시 $P_C > P_B$, $V_C < V_B$ 이므로 표 1의 Case 3이 되고, 다음 기준전압은 V_D 가 된다. 동작점이 D인 경우 $P_D < P_C$, $V_D < V_C$ 이므로 표 1의 Case 1에 해당되며, 다음 기준전압은 V_D 보다 ΔV 만큼 큰 V_E 가 된다.

이와 같이 ΔV_{PV} 와 ΔP_{PV} 의 극성에 따라 다음 기준전압을 결정하는 방법이 PO 방식이며, 그 결과 그림 6에서 일사량 변동이 없는 경우 B점과 D점 사이에서 동작점을 변동시키면서 MPP(Maximum Power Point) 부근에서 동작하게 된다. 위의 동작 특성에 따라 PO MPPT를 순서대로 나타내면 다음 그림 7과 같다.

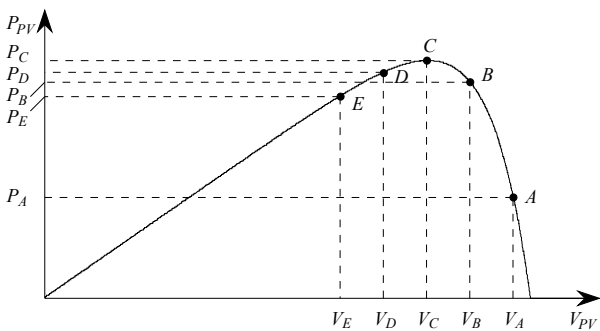


그림 6 태양전지의 $P-V$ 특성곡선과 동작점

Fig. 6 $P-V$ characteristic curve and operating point of solar cell

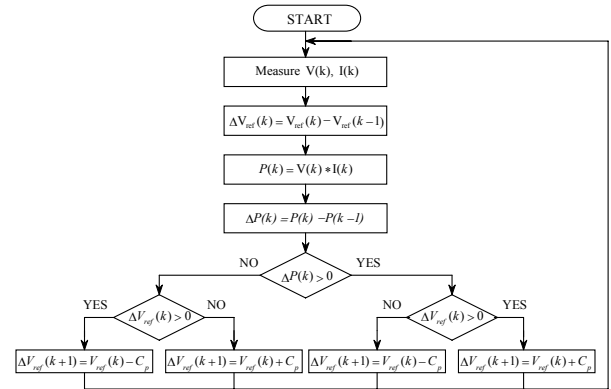


그림 7 PO MPPT의 순서도

Fig. 7 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 8은 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 8에서 최대전력점은 B점에 위치하고 있으며, 이때의 기울기는 0이다. 최대전력점을 기준으로 왼쪽은 양의 기울기를 가지고, 오른쪽은 음의 기울기를 가지고 있음을 알 수 있다.

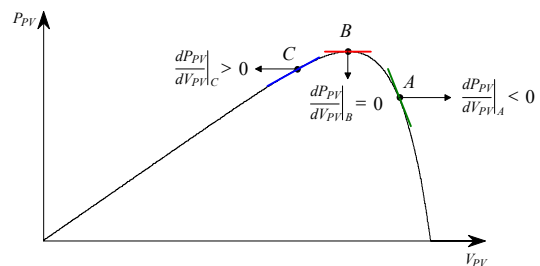


그림 8 IC MPPT의 제어 원리

Fig. 8 Control theory of IC MPPT

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

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (16)$$

식(3.1)을 위의 그림 8에 적용하면 A점, B점, 그리고 C점에서 다음 식(17) ~ 식(19)과 같이 나타난다.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \text{ (at Point A)} \quad (17)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \text{ (at Point B)} \quad (18)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \text{ (at Point C)} \quad (19)$$

즉, 식(17) ~ 식(19)의 부호에 의해서 현재 동작점의 위치를 판별할 수 있다. 식(17) ~ 식(19)에 의해 판별된 동작점의 위치가 MPP의 왼쪽에 위치하는 경우 전압 기준치를 상승시키고, 오른쪽에 위치할 경우 전압 기준치를 하강시켜 최대전력점을 추종한다. 식(17) ~ 식(19)에 의해 현재 동작점의 위치가 최대전력점을 위치한다고 판별된 경우에는 전압 기준치를 변동시키지 않는다. 또한 MPP점을 추종하고 있는 상태에서 일사량 변화가 존재하는 경우에는 전류의 변동($I_{PV}[n]-I_{PV}[n-1]$)을 이용하여 전압 기준치를 변동시킨다. 그림 9는 일사량에 따른 태양전지 어레이의 $P-V$, $I-V$ 출력 특성 곡선을 나타낸다.

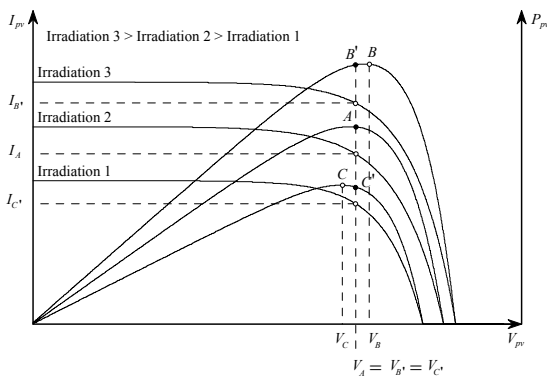


그림 9 일사량 변동에 대한 IC MPPT의 동작
Fig. 9 Operating of IC MPPT with radiation changing

그림 9에서 현재 동작점의 일사량이 irradiation 2 상태에서 최대전력점인 A점에 위치하고 있다고 가정한다. 이때, 일사량이 irradiation 3으로 증가하게 되는 경우 IC MPPT는 최대전력점을 인식하고 있었으므로 전압을 변동하지 않는 상태이고, 따라서 동작점은 점 B'로 이동하게 된다. 점 B'는 최대전력점 B의 왼쪽에 존재하므로 최대전력점을 추종하기 위해서는 전압 기준치(V_{PV}^*)를 증가시켜야한다. 일사량이 irradiation 2에서 irradiation 1로 감소한 경우 동작점은 A점에서 C'점으로 이동하게 되고 이는 irradiation 1의 최대전력점인 C점의 오른쪽에 존재하게 되므로 전압 기준치를 감소시켜 최대전력점을 추종한다. 위의 내용을 바탕으로 IC MPPT의 동작을 순서도로 나타내면 그림 10과 같다.

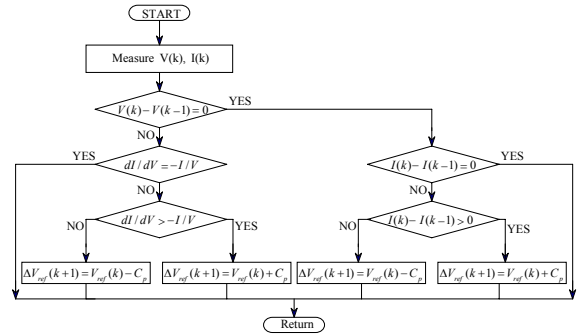


그림 10 IC MPPT 제어의 순서도
Fig. 10 Flowchart of IC MPPT control

IC 방식은 PO 방식에서 간과하고 있는 MPP점에서의 동작이 추가되어 있으므로, 일정 일사량 및 일정 온도에서는 PO에서 발생하는 MPP에서의 자려 진동이 이론상 존재하지 않는다는 장점을 갖는다. 하지만 실제로 PCS의 최초 동작점과 전압 기준치의 변동 폭, 그리고 MPP점이 정확하게 동기화되기 어렵고, 순시적으로 완전히 일정한 환경 조건이 성립되기 어렵기 때문에 IC 제어방법 역시 MPP에서의 자려 진동이 존재한다.

그림 10에서 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.

4. 제시한 ML-PO MPPT 제어방법

발전 시간에 제약을 갖는 태양광발전 시스템의 특성상 온도와 일사량에 의한 영향을 고려하여 MPPT를 수행함으로써 태양광발전 시스템의 효율성을 향상시킬 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 전류제어형 MPPT 제어를 제시하고 알고리즘의 간소함을 위한 Multi-level PO 방법의 알고리즘을 제시한다.

전류제어형 MPPT 알고리즘은 종래의 PO 방법을 개선한 알고리즘으로서 환경조건에 따라 스텝 크기를 변화시키는 방법을 나타낸다. 제시한 Multi-level PO MPPT 알고리즘의 과정은 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 현재 전력과 이전 전력을 비교하여 변화량을 통해 3가지의 가속계수 중 하나를 선택할 수 있다. 그 다음은 종래의 PO 방법과 마찬가지로 이전의 진동이 최대전력점으로 향하는지 또는 멀어지는지를 판별하고, 현재 동작전압이 최적전압보다 높은지 또는 낮은지를 판별하여 4가지의 동작모드로 운전한다.

이러한 4가지의 동작 모드는 스텝 크기를 결정하는데 서로 다른 이득 계수를 갖으며, 이는 이전의 진동 스텝의 크기에 의존한다. 각 반복 루프에서 새로운 지령전류 I_{ref} 는 진동의 스텝 크기 ΔI 에 이전의 지령전류를 더하며 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) + \alpha \Delta I \quad (20)$$

여기서 가속 계수 α 는 일사량 및 온도 변화 등의 환경 변화에 민감하게 동작하도록 제어된다. 또한 최적전압과 최적전류의 변화 폭이 클 경우에 최대전력점으로 빠르게 추종할 수 있도록 하며, 실제 최대전력점에서 MPPT 제어가 정확하게 변환되도록 수행한다. 진동 스텝의 크기는 현재 전력과 이전 전력의 민감도에 의존한다.

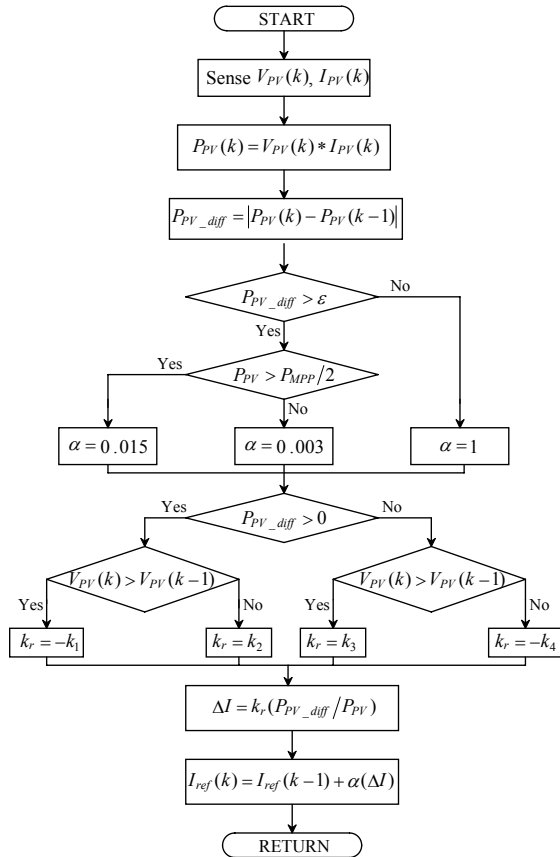


그림 11 제시한 PO MPPT 알고리즘의 순서도
Fig. 11 Flowchart of proposed PO MPPT algorithm

진동 스텝의 신호는 $P-V$ 특성곡선에서 기울기 신호에 대한 방향을 나타내는 k_r 에 의해 결정되며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta I = k_r \frac{P_{PV_diff}}{P_{PV}} \quad (21)$$

$$P_{PV_diff} = P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1) \quad (22)$$

여기서 $P_{PV}(k)$ 는 k 번째 샘플링 기간 동안의 PV 전력을 나타내고, $P_{PV}(k-1)$ 는 $k-1$ 번째의 샘플링 기간 동안 측정된 PV 전력을 나타낸다. 또한 k_r 은 진동 방향과 dP_{PV}/dV_{PV} 의 기울기 방향으로 혼합된 4가지 동작모드에

대한 계수를 나타낸다. 진동 사이클은 PV 전력이 최대전력점에서 유지될 수 있도록 환경 조건의 변화에 대해 반복되어 수행한다.

MPPT 변환은 최대전력점을 추종하기 위해 DC-DC 승압형 컨버터에서 수행된다. 전류제어형 MPPT 제어를 수행하기 위한 승압형 컨버터의 구조는 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 제시한 DC-DC 컨버터 제어 알고리즘은 입력과 출력을 포함하고 있으며, 개선된 PO 제어 알고리즘을 통한 출력은 최적전류인 지령전류 I_{ref} 를 출력한다. 출력된 I_{ref} 는 DC-DC 컨버터의 인덕터 전류 I_L 과 비교하여 PI 제어기로 입력된다. PI 제어기의 출력은 톱니파와 비교하여 PWM을 형성하고 이러한 신호는 Duty cycle로 DC-DC 컨버터의 스위칭 동작을 수행하여 최종적인 MPPT 제어로 동작한다.

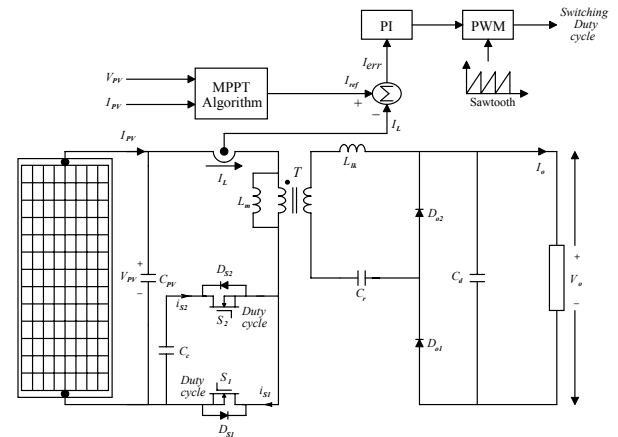


그림 12 MPPT 제어를 위한 DC-DC 컨버터의 구성도
Fig. 12 Configuration of DC-DC converter for MPPT control

5. 시스템 성능 결과 및 분석

MPPT 제어를 수행하는 각각의 알고리즘에 대한 성능분석을 위한 PSIM 회로도에는 그림 13과 같다. 표 2는 MPPT 제어의 성능분석을 위한 태양전지 모듈의 파라미터를 나타낸다. 태양전지 모듈의 파라미터는 AM 1.5, 온도 25[°C] 및 일사량 1000[W/m²]의 실험조건에서 측정된 값을 나타낸다.

표 2 태양전지 모듈의 파라미터
Table 2 Parameter of solar cell module

파라미터	기호	측정값	단위
개방전압	V_{oc}	42.8	[V _{dc}]
단락전류	I_{sc}	8.42	[A]
최대전력 전압	V_{mp}	34.6	[V _{dc}]
최대전력 전류	I_{mp}	6.5	[A]
최대전력	P_{mp}	225	[W]

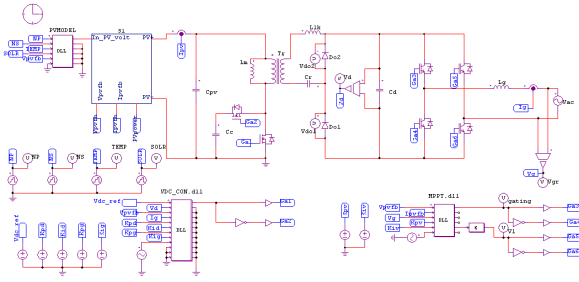
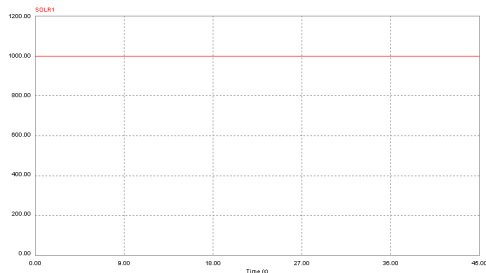


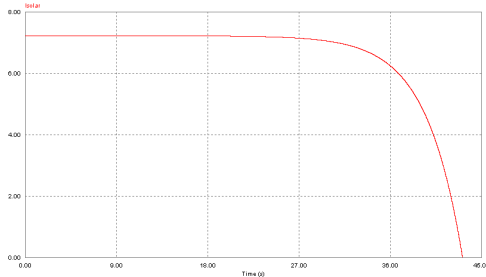
그림 13 MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도
Fig. 13 PSIM circuit for MPPT control

5.1 일사량이 일정한 경우

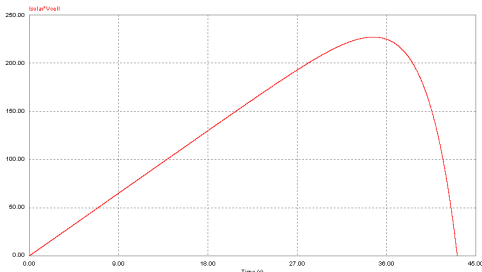
그림 14는 일사량이 1000[W/m²]으로 일정한 경우를 나타내며, 그림 14(a)는 일사량과 그림 14(b)는 태양전지의 전류 및 그림 14(c)는 태양전지의 전력을 나타내고 있다. 일사량이 일정한 경우에 태양전지 모듈의 최적전압은 34.6[V], 최적전류는 6.5[A] 및 최대전력은 약 225[W]로 나타나고 있다.



(a) Radiation



(b) $I-V$ characteristic curve of solar cell module

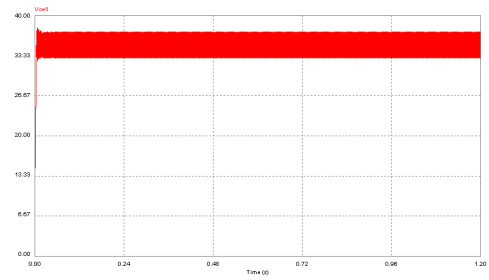


(c) $P-V$ characteristic curve of solar cell module

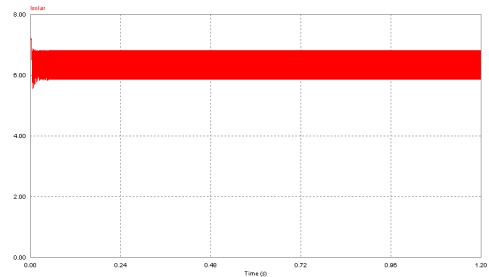
그림 14 일사량이 일정한 경우의 태양전지 모듈의 특성곡선
Fig. 14 Characteristic curve of solar cell module with constant radiation

5.1.1 PO 제어방법

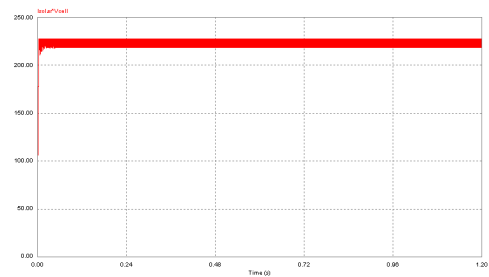
그림 15는 PO MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 16은 PO 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 출력전력과 이론적인 최대전력의 오차를 나타내고 있다. PO 제어방법의 최대전력 오차는 약 8.5[W]에서 자려 진동하고 있다.



(a) Output voltage of solar cell module



(b) Output current of solar cell module



(c) Output power of solar cell module

그림 15 태양전지 모듈의 응답특성(PO 방법)
Fig. 15 Response characteristic of solar cell module(PO method)

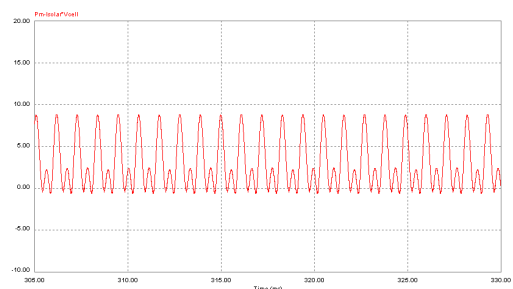
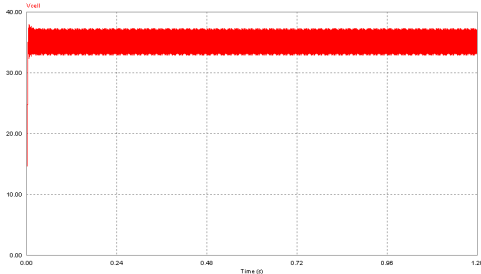


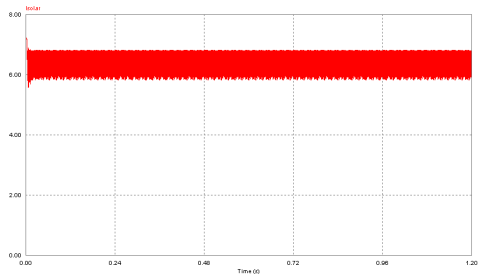
그림 16 태양전지 모듈의 출력오차(PO 방법)
Fig. 16 Output power error of solar cell module(PO method)

5.1.2 IC 제어방법

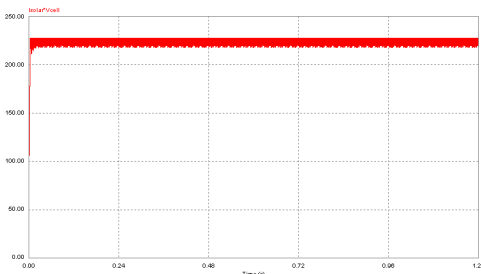
그림 17은 IC MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 18은 IC 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 출력전력과 이론적인 최대전력의 오차를 나타내고 있다. IC 제어방법의 최대전력 오차는 약 7~9[W] 사이에서 자러 진동하고 있다.



(a) Output voltage of solar cell module



(b) Output current of solar cell module



(c) Output power of solar cell module

그림 17 태양전지 모듈의 응답특성(IC 방법)

Fig. 17 Response characteristic of solar cell module(IC method)

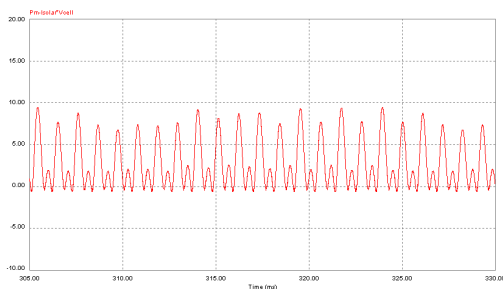
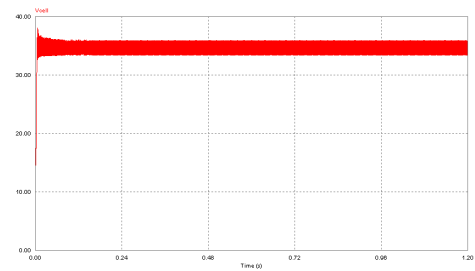


그림 18 태양전지 모듈의 출력오차(IC 방법)

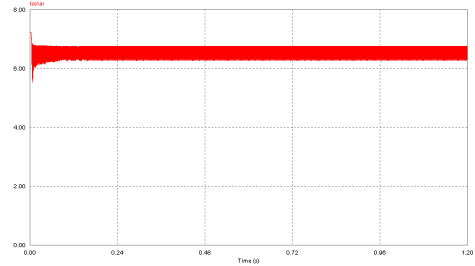
Fig. 18 Output power error of solar cell module(IC method)

5.1.3 제시한 ML-PO 제어방법

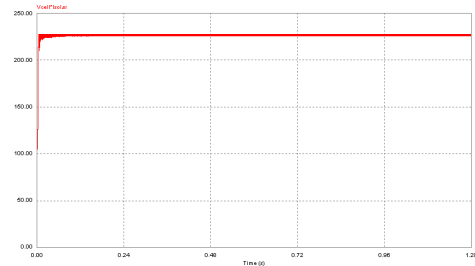
그림 19는 제시한 MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 20은 제시한 제어방법에 대한 최대전력의 오차를 나타낸다. 제시한 제어방법의 기준 전류 제어방식으로 진동 폭이 매우 작고, 알고리즘에 의해 정상상태에서는 진동 폭이 더욱 작아져 전력 오차를 줄일 수 있으며 측정된 전력 오차는 약 1[W] 이내에서 자러 진동하고 있다.



(a) Output voltage of solar cell module



(b) Output current of solar cell module



(c) Output power of solar cell module

그림 19 태양전지 모듈의 응답특성(제시한 방법)

Fig. 19 Response characteristic of solar cell module(proposed method)

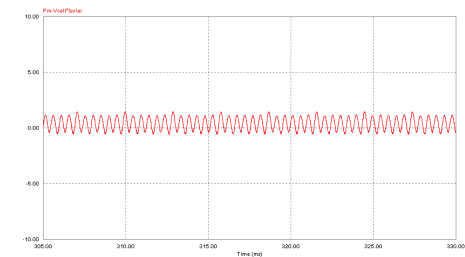
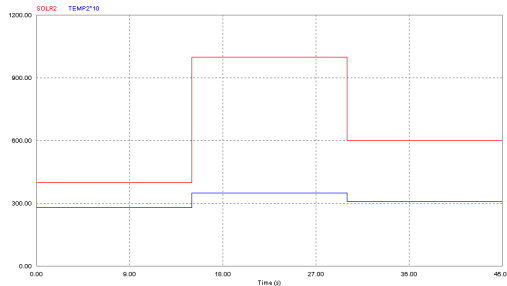


그림 20 태양전지 모듈의 출력오차(제시한 방법)

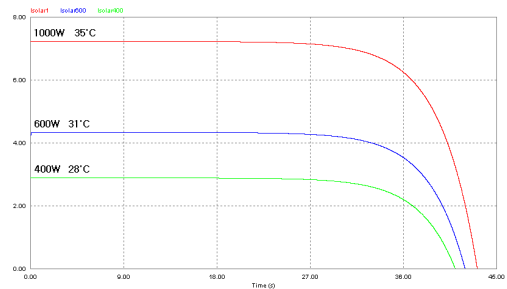
Fig. 20 Output power error of solar cell module(proposed method)

5.2 일사량과 온도가 변동할 경우

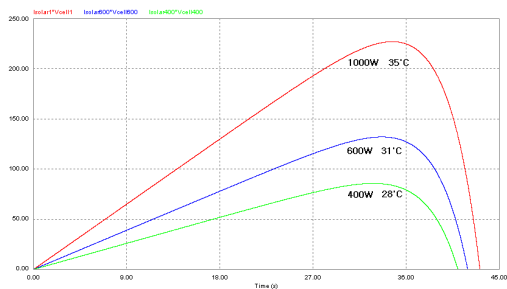
그림 21은 일사량이 400[W/m²]->1000[W/m²]->600[W/m²]으로 변동함에 따라 온도가 28[°C]->35[°C]->31[°C]로 변화할 경우를 나타낸다. 그림 21(a)은 일사량 및 온도의 변화, 그림 21(b)은 일사량과 온도 변화에 따른 태양전지의 I-V 특성곡선 및 그림 21(c)은 같은 조건에서 태양전지의 출력전력을 나타내고 있다. 일사량 및 온도 변화 조건에 따라 최적전압과 최적전류는 (32.9[V], 2.56[A]), (34.6[V], 6.5[A]), (33.8[V], 3.9[A])로 나타난다.



(a) Changed radiation and temperature



(b) I-V characteristic curve of solar cell module



(c) P-V characteristic curve of solar cell module

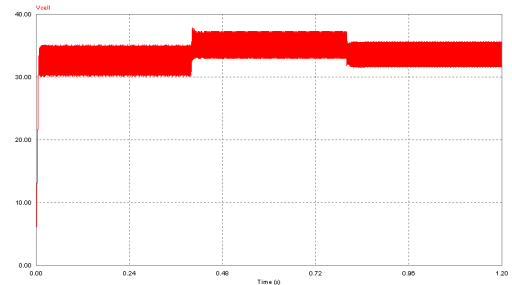
그림 21 일사량 및 온도가 변동할 경우의 태양전지 모듈의 특성곡선

Fig. 21 Characteristic curve of solar cell module with changed radiation and temperature

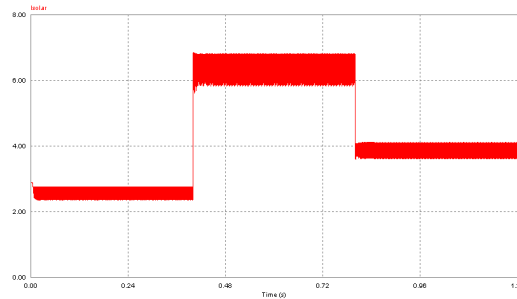
5.2.1 PO 제어방법

그림 22는 PO MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 23은 PO 제어방법에 대한 태양

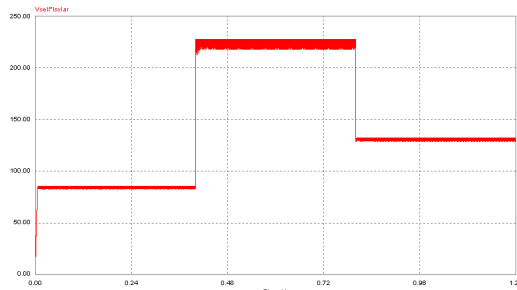
전지 모듈의 출력전력과 이론적인 최대전력의 오차를 나타내고 있다. 일사량 및 온도 변화에 대한 PO 제어방법의 최대전력 오차율은 약 3.9[%]를 나타내고 있다.



(a) Output voltage of solar cell module



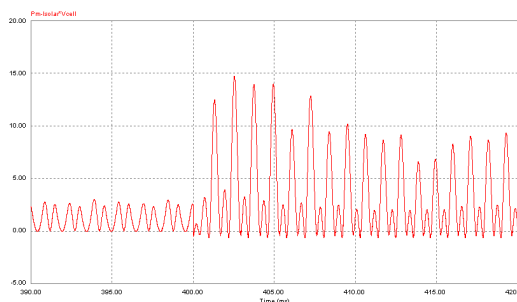
(b) Output current of solar cell module



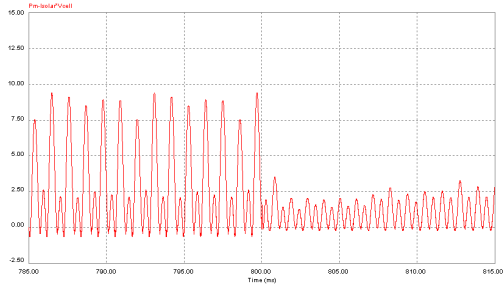
(c) Output power of solar cell module

그림 22 태양전지 모듈의 응답특성(PO 방법)

Fig. 22 Response characteristic of solar cell module(PO method)



(a) 400[W/m²], 28[°C]->1000[W/m²], 35[°C]



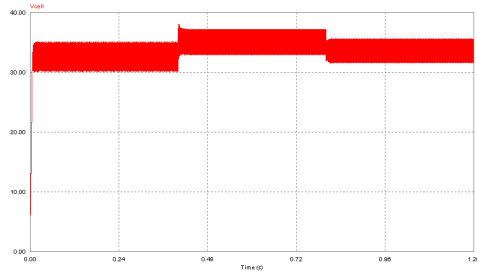
(b) 1000[W/m²], 35[°C]→600[W/m²], 31[°C]

그림 23 태양전지 모듈의 출력오차(PO 방법)

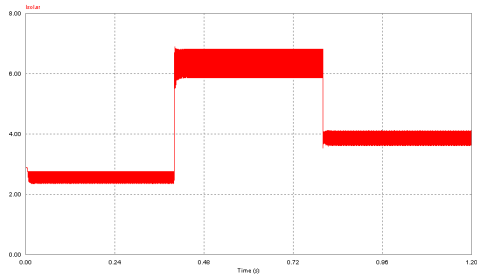
Fig. 23 Output power error of solar cell module(PO method)

5.2.2 IC 제어방법

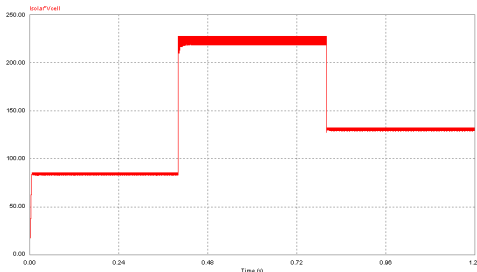
그림 24는 IC MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 25는 IC 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 출력전력과 이론적인 최대전력의 오차를 나타내고 있다. IC 제어방법의 최대전력 오차율은 약 3.6[%]을 나타내고 있다.



(a) Output voltage of solar cell module



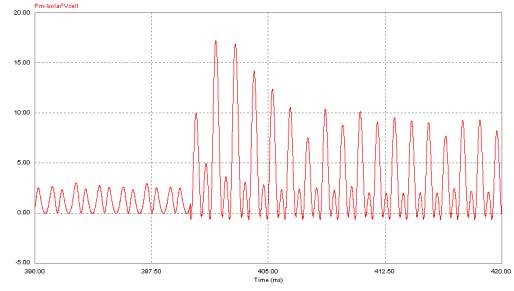
(b) Output current of solar cell module



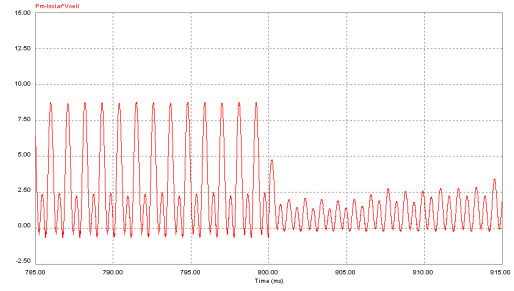
(c) Output power of solar cell module

그림 24 태양전지 모듈의 응답특성(IC 방법)

Fig. 24 Response characteristic of solar cell module(IC method)



(a) 400[W/m²], 28[°C]→1000[W/m²], 35[°C]



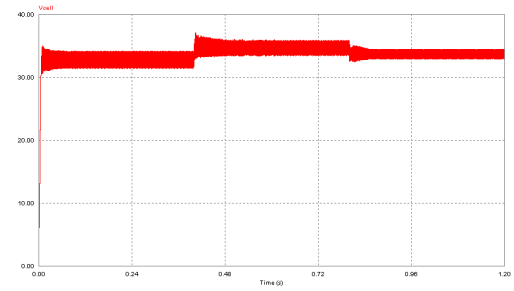
(b) 1000[W/m²], 35[°C]→600[W/m²], 31[°C]

그림 25 태양전지 모듈의 출력오차(IC 방법)

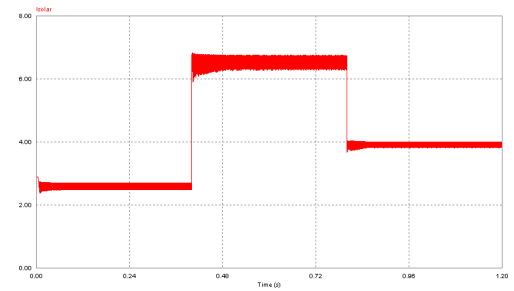
Fig. 25 Output power error of solar cell module(IC method)

5.2.3 제시한 ML-PO 제어방법

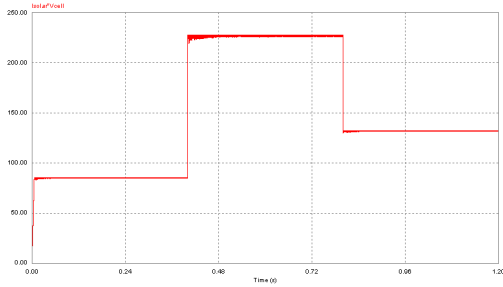
그림 26은 제시한 MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 그림 27은 제시한 제어방법에 대한 최대전력의 오차를 나타낸다. 제시한 제어방법의 최대전력 오차율은 1[%] 이내로 양호한 최대전력 추종 성능을 나타낸다.



(a) Output voltage of solar cell module

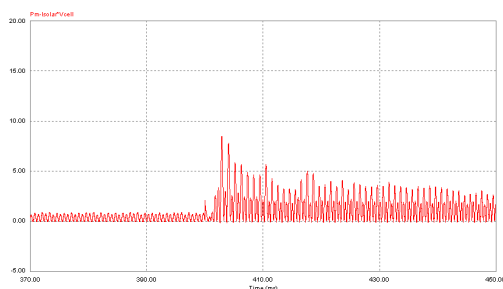


(b) Output current of solar cell module

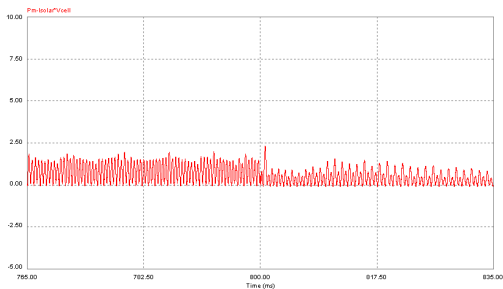


(c) Output power of solar cell module

그림 26 태양전지 모듈의 응답특성(제시한 방법)
Fig. 26 Response characteristic of solar cell module (proposed method)



(a) 400[W/m²], 28[°C]→1000[W/m²], 35[°C]



(b) 1000[W/m²], 35[°C]→600[W/m²], 31[°C]

그림 27 태양전지 모듈의 출력오차(제시한 방법)
Fig. 27 Output power error of solar cell module(proposed method)

6. 결 론

본 논문에서는 일사량 및 온도 등의 환경조건 변화에 강한 ML-PO MPPT 제어방법을 제시하였다. PV(Photovoltaic)의 최대전력점은 일사량과 온도에 따라 변하기 때문에 출력 효율을 증가시키기 위해 최대 전력점에서 동작하도록 최대 전력점을 추적하는 기술은 매우 중요한 부분으로 인식되고 있다.

제시한 ML-PO의 전류제어형 MPPT 알고리즘은 종래의 PO 방법을 개선한 알고리즘으로서 환경조건에 따라 스텝 크기를 변화시키는 방법을 나타낸다. 종래의 PO 방법과 IC 제어 방법은 지속적인 일정 스텝값을 인가하기 때문에 정상 상태에서 자러 진동값을 갖게 된다. 이러한 자러 진동값이

클수록 태양광 발전 시스템의 효율을 떨어지게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 정상상태에서 자러 진동 값이 전력오차에 따라 적어지게 되는 ML-PO 방법을 제시하였다. 제시한 ML-PO 방법은 종래의 PO와 IC 방법과 응답특성을 일사량이 일정한 경우와 일사량과 온도 등의 환경 변수가 변할 경우에 대한 정상상태 오차를 비교하였다. 제시한 ML-PO 방법은 종래의 MPPT 제어 방법에 비해 출력 오차율이 1[%] 이내로 우수한 응답특성을 나타냈다.

이로써 본 논문에서 제시한 ML-PO의 MPPT 제어 방법의 추종성능에 대한 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었으며 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A Brambilla, "New Approach to Photovoltaic Arras Maximum Power Point Tracking", Proceeding of 3th IEEE Power Electronic Conference, Vol. 2, pp.632-637, 1998.
- [2] Brad Bryant, Marian K. Kazimierczuk, "Modeling th closed-current Loop of PWM Boost DC/DC Converters Operating in CCM with Peak Current-Mode Control", IEEE Transactions on Circuits and Systems-Regular Papers, Vol. 52, pp2404-2412, 2005.
- [3] W. Swieger and J. Enslin, "AN Integrated Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic panel ",Proceeding of IEEE Power international Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, pp.40-44, 1998.
- [4] 이상용, "외란에 강인한 최대 전력점 추종기를 갖는 태양광 발전 시스템에 관한 연구", 건국대학교 대학원, 석사학위 청구논문, 2003.
- [5] 강안중, 김태우, 김학성, "일사량 급변에 대한 P&O 알고리즘의 개선", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp.117-120, 2004.
- [6] 설재용, 장재정, 김동민, 이승혁, 김진오, "중분컨덕턴스 MPPT제어 기반 계통연계형 태양광 발전시스템의 전력품질 평가", 대한전기학회 논문지, 제56권, 제1호, pp.8-13, 2007.
- [7] 문성창, "최적의 MPPT 알고리즘에 관한 연구", 경남대학교 대학원, 석사학위 청구 논문, 2004.
- [8] 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, Jul. 2005.
- [9] E. Roman, P. Ibanez, S. Elorduzapatarietxe , R. Alonso, D.Goitia, and I. Martinez de Alegia "Intelligent PV module for grid-connected PV systems," in Proc. IEEE 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3082-3087, Nov. 2004.
- [10] 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, Sep. 2006.

- [11] R. Kiranmayi, K. Vijaya Kumar Reddy and M. Vijaya Kumar "Modeling and a MPPT method for solar cells" J. Eng. Applied Sci., 3(1) pp. 128-133, 2008.
- [12] 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.
- [13] Yeong-Chau Kuo, Tsorng-Juu Liang and Jiann-Fuh Chen., "Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system" , IEEE Trans. Ind. Electronics., Vol. 48, pp.594-601, 2001.

저 자 소 개



최 정 식 (崔 正 植)

1980년 2월 9일생, 2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업, 2007년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2011년 1월 ~ 현재 전자부품연구원 선임연구원.

Tel : (062)975-7038

Fax : (062)975-7039

E-mail : cjs1108@keti.re.kr



정 동 화 (鄭 東 和)

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 정보통신공학부 교수

Tel : 061-750-3543,

Fax : 061-752-9841

E-mail : hwa777@scnu.ac.kr