

소규모 태양광 발전시스템을 위한 전류보상기법을 갖는 향상된 MPPT 추적 컨버터

노형주*, 이동윤, 현동석
한양대학교 전기공학과

An Improved MPPT Converter with Current Compensation Method for Small Scaled PV-Applications

Hyeong-Ju Noh*, Dong-Yun Lee and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

An improved MPPT converter with current compensation method for small-scaled PV-applications is presented in this paper. The proposed method implements maximum power point tracking (MPPT) by variable reference current which is continuously changed during one sampling period. Therefore, the power transferred to the load is increased above 9% by the proposed MPPT converter with current compensation method. As a result, the utilization efficiency of Photovoltaic (PV)-panel can be increased. In addition, as it doesn't use digital signal processor (DSP), this MPPT method has the merits of both a cost efficiency and a simple control circuit design. Therefore, it is considered that the proposed MPPT method is proper to low power, low cost PV-applications.

The concept and control principles of the proposed MPPT method are explained in detail and its validity of the proposed method is verified through several simulated results.

1. 서 론

최근, 에너지 고갈 및 환경오염 문제가 갈수록 심각해짐에 따라 무한정 재생가능하고 또한 환경오염을 유발시키지 않는 새로운 대체에너지 개발에 대한 관심이 꾸준히 증가되어 왔다. 지금까지 개발된 여러 가지 대체에너지 자원 중, 특히 광전지(Photovoltaic Cell)는 어떤 환경오염도 유발시키지 않으면서 빛을 직접 전기에너지로 변환시킬 수 있는 능력을 가지고 있기 때문에 에너지 위기문제에 대한 중요한 해결책으로써 태양광 발전시스템(Photovoltaic Generation System)이 대두되고 있다. 비록, 개발초기에 태양광전지는 가격이 매우 고가였지만, 최근 반도체 기술 및 제조공정의 발달로 인하여 수십 년 이내에 태양광 발전시스템은 기존의 화석연료 발전시스템과 충분히 경쟁을 이룰 수 있을 것으로 사려된다.

이러한 태양광 발전을 수행하기 위한 태양광전지는 외부 환경조건, 즉 일사량, 셀의 온도, 부하 등에 따라 그 출력 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선이 비선형적으로 변화되는 특징을 가지고 있다. 따라서 주어진 외부조건에 대하여 태양광전지가 항상 최대전력 점(Maximum Power Point) 근처에서 동작하도록 최대전력 점을 추적해야만 한다. 따라서 현재 태

양광 전지의 최대전력 점을 추적하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]-[10].

그 중 대표적인 추적시스템은 DSP를 근간으로 하는 대용량 발전시스템 [1]-[6]과 DSP를 사용하지 않는 소규모 발전시스템 [7]-[10]으로 분류될 수 있다.

DSP를 근간으로 하는 추적 시스템에는 Hill-climbing method [1]-[5]와 태양광 전지의 단락전류(I_{sc})를 근간으로 하는 최대전력 점 추적시스템 [6] 등이 있다.

먼저, Hill-climbing method 중에서, P&O 방식은 태양광전지의 출력전압을 주기적으로 증가 또는 감소시킴으로써 최대전력 점을 추적하는 방식으로 비교적 제어알고리즘이 간단하면서도 우수한 추적 성능을 나타낸다. 하지만 외부조건이 일정하거나 아주 천천히 변화되는 경우 P&O 방식은 최대전력 점 근처에서 발진하게 되며, 또한 외부조건이 급변하는 경우에도 최대전력 점 추적이 실패하게 되는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 Incremental Conductance Method는 태양광 전지의 출력 P-V 특성곡선 상에서 증분 컨덕턴스와 순시 컨덕턴스를 비교하여 최대전력 점을 추적한다. 이 방식은 외부조건이 급변하는 경우에도 최대전력 점을 매우 잘 추적하지만 비교적 복잡한 제어 알고리즘으로 인하여 연산수행속도가 늦어져 최대전력 점을 찾는 반응속도가 떨어지는 단점이 있다.

이에 반해, 단락전류(I_{sc})를 베이스로 하는 최대전력 점 추적 방식은 최대전력 점에서의 동작전류(I_{op})가 단락전류(I_{sc})에 선형적으로 비례한다는 사실을 이용한 것이다 [6]. 이 방식은 외부조건 변화 시 최대전력 점을 추적하는 응답속도가 매우 빠른 장점이 있지만 단락전류를 샘플링하기 위해 추가된 스위치와 다이오드로 인해 제어회로가 복잡해지고 MPPT 컨버터의 도통손실이 증가되는 문제점이 있다.

이와 같이, DSP를 베이스로 하는 이러한 방식들은 1KW 이상의 대용량 발전시스템에는 적합할 것으로 사려 되지만 50-150W 정도의 소규모 시스템에서는 DSP를 사용하는 것이 비용적인 면에서 비경제적이라는 단점이 있다.

따라서 최근 소규모 태양광 시스템을 위한 DSP를 사용하지 않는 최대전력 점 추적 방식들에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [7]-[10]. 그 중에서 한 샘플링 주기 내에서 고정된 전압 레퍼런스를 이용한 최대전력 점 추적방식 [10]은 최대전력 점에서의 동작전압(V_{op})이 태양광 전지의 개방전압(V_{oc})에 대하여 거의 선형적으로 변화되는 점을 이용한 방

식으로 제어회로가 매우 단순하며 또한 DSP를 사용하지 않기 때문에 비용적인 면에서 매우 경제적인 장점이 있다. 하지만, 이 방식은 샘플링이 이루어진 후 다음 번 샘플링이 발생할 때 까지 전압 레퍼런스 가 일정하게 유지되기 때문에 한 샘플링주기 동안에는 태양광 패널의 출력전압이 고정된 전압 레퍼런스를 추종하게 되어 항상 출력오차를 갖는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에 제안한 전류보상기법을 갖는 향상된 최대전력 점 추적방식에서는, 외부조건 변화 시 매 스위칭 주기마다 전압 레퍼런스를 변화시키고 동작전압이 이를 추종토록 하는 기존의 Hill-climbing 방식에서처럼, 태양광 패널의 출력전류가 한 샘플링 주기 내에서도 매 스위칭 주기마다 연속적으로 변화되는 전류 레퍼런스를 추종토록 하여 최대전력 점을 추적하는 전류보상기법(Current compensation method)을 사용하였다. 이 제안한 최대전력 점 추적 시스템의 개념 및 제어원리가 자세히 설명되고 있고 제안한 제어기법의 타당성이 시뮬레이션을 통해 검증되고 있다.

2. 태양광 전지의 특성

그림 1은 태양광 전지(Photovoltaic Cell)의 전형적인 등가 회로를 나타내고 있다.

태양광 전지의 전형적인 I-V 특성은 다음 식 (1)과 같다.

$$I_0 = I_{Lg} - I_{rs} \{ e^{qAKT_c(V_0 + I_0 R_s) - I} - (V_0 + I_0 R_s) / R_{sh} \} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } I_{Lg} = \{ I_{sc} + K_1(T_c - 25) \} \lambda, I_{rc} = \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{qE_{opt}}{BK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right)}$$

그림 2(a)는 태양광 전지의 전형적인 출력 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선을 나타내고 (b)와(c)는 각각 일사량 및 광전지의 온도가 변화되는 경우 출력 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선을 보여주고 있다. 이 그림들로부터 태양광 전지의 출력특성이 비선형적이라는 것과 각각의 특성곡선이 단지 한 개의 최대전력 점(MPP)만을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 광전지 출력전류가 일사량 변화에 대하여 주로 영향을 받는 반면, 광전지 출력전압은 태양광 전지의 온도변화에 주로 영향을 받음을 알 수 있다. 이와 같이, 태양광 전지는 외부조건 변화 시 그 특성이 비선형적으로 변하기 때문에 태양광 패널을 효율적으로 사용하기 위해서는 반드시 최대전력 점 추적(MPPT)을 수행하는 것이 바람직하다.

3. 소규모 태양광시스템을 위한 제안한 최대 전력점 추적방식

3.1 개방회로 전압을 이용하는 기존의 방식[10]

그림 3은 기존의 DSP를 사용하지 않는 소규모 발전 시스템에서 최대전력 점을 추적하는 컨버터 회로를 나타내고 있다. 먼저, 이 방식에서는 태양광 전지의 최대전력 점에서의 동작전압(V_{op})이 개방회로 전압(V_{oc})에 선형적으로 비례한다는 사실을 이용하였다.

$$V_{op} = KV_{oc} \quad (2)$$

식 (2)에서 비례상수, K,의 값은 위 식 (2)가 성립되는 영역에서는 약 0.76정도($\pm 2\%$)이다. 그림.4는 식 (2)에 의해 생성된 전압 레퍼런스(V^*)를 보여주고 있다. 이 전압 레퍼런스는 한 샘플링주기 동안 Hold-circuit에 의해 고정된 값으로 유지된다.

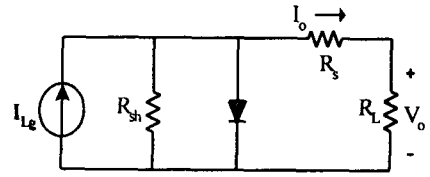
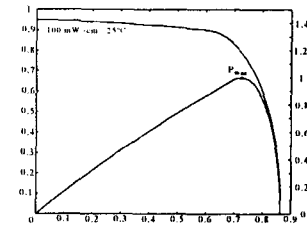
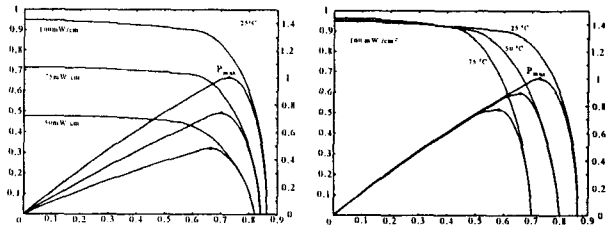


그림 1. 태양광 전지의 등가모델.

Fig.1. The equivalent model of photovoltaic cell.



(a) Typical characteristic curve



(b) Irradiation variations

(c) Temperature variations

그림 2. 태양광 전지의 출력 특성.

Fig. 2. The output characteristic curves of PV-cell.

이 방식은 태양광 전지의 개방회로 전압(V_{oc})을 샘플링한 후 식 (2)를 이용하여 동작전압(V_{op})을 구한 후 이를 전압 레퍼런스(V^*)로 취한다. 이 전압 레퍼런스(V^*)와 태양광 패널의 출력전압(V_{pv})을 비교하여 스위치에 듀티 신호를 인가하므로써 최대전력 점이 추종된다. 따라서 이 제어방식은 DSP를 사용하지 않고 또한 매우 간단한 제어회로를 가지고서도 비교적 최대전력 점을 잘 추적한다. 그러나 이 방식은 그림 4에서 보여지는 것처럼 샘플링이 이루어진 후 다음 번 샘플링이 발생할 때 까지 전압 레퍼런스(V^*)가 일정하게 유지되기 때문에 태양광 패널의 출력전압이 매 스위칭 주기마다 고정된 전압 레퍼런스(V^*)를 추종하게 되어 항상 출력전력에 상당한 오차를 갖는 문제점이 있다.

3.2 제안한 전류보상기법을 이용한 최대전력점 추적시스템

그림 5는 제안한 최대전력 점 추적 시스템의 블록도이다. 그림 6은 태양광 전지의 최대전력 점에서의 동작전압(V_{op})과 동작전류(I_{op})의 관계를 보여주고 있다. 본 논문에 제안한 전류보상기법을 갖는 최대전력 점 추적시스템의 원리는 다음과 같다.

위에서 언급했던 기존방식의 문제점을 해결하기 위해, 제안한 방식에서는, 전압 레퍼런스(V^*)가 매 스위칭 주기마다 반복적으로 일정크기만큼 증가 또는 감소되는 기존의 Hill-climbing 방식에서와 같이, 한 샘플링 주기 내에서도 전류 레퍼런스(I^*)가 연속적으로 변화되도록 하는 원리이다. 이는, 그림 6의 태양광 전지의 출력 I-V 곡선에서, 최대전력 점(MPP)에서 광전지의 동작전압(V_{op})이 교차되는 동작 전류(I_{op})가 바로 최대전력 점 전류라는 사실을 이용한 것이다.

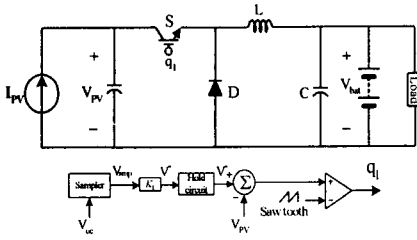


그림 3. 개방회로 전압을 이용한 기존의 MPPT 컨버터.

Fig. 3. The conventional MPPT converter using Open voltage(V_{oc}).

그림 5에서 샘플러가 태양광 패널의 개방전압을 샘플링한 후 식 (2)에 의해 전압 레퍼런스(V^*)를 생성하고 이것이 태양광 패널의 출력전압과 비교되어 그림 7에서 보여지는 것처럼 한 샘플링 주기내에서도 연속적으로 변하는 전류 레퍼런스(I^*)를 만든다. 그 후 이 전류 레퍼런스(I^*)가 태양광 패널의 출력전류와 비교 되어 MPPT 컨버터의 스위치에 듀티 신호를 인가하는 방식이다. 따라서 제안한 방식에서는 기존의 방식과는 달리 태양광 패널의 출력전류가 한 샘플링주기 내에서도 연속적으로 가변 되는 전류 레퍼런스(I^*)를 추종하므로써 출력 전력의 오차가 현저히 감소하게 된다. 또한 그림 5에서 보여지듯이 전류제어기는 PI제어기를 사용하였다. 사용된 PI 제어기에서, 매 스위칭 주기마다 가변 되는 전류 레퍼런스(I^*)를 보상하기 위해 적분기(I-controller)는 매 스위칭 주기마다 리셋이 가능한 적분기를 사용하였다 [11].

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에 제안한 50-150W 소규모 태양광발전 시스템에 적합한 전류보상기법을 갖는 개선된 최대전력 점 추적시스템의 이론적 추론의 타당성을 검증하고 기존 방식과의 비교를 위해 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8은 시뮬레이션을 수행하기 위한 회로도이며 본 시뮬레이션은 PSIM에 의해 수행되어졌다. 그림 8에서 DLL1은 태양광 모듈의 각종 파라미터를 입력하기 위한 부분이고 DLL2는 일사량을 가변시키기 위한 부분이다.

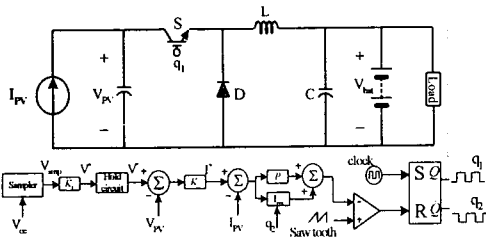


그림 5. 전류보상기법을 갖는 제안한 MPPT 컨버터.

Fig. 5. The proposed MPPT converter with current compensation method.

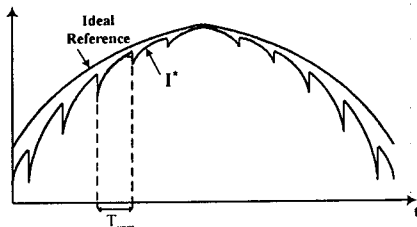


그림 7. 한 샘플링 주기동안에 연속적으로 가변되는 전류 레퍼런스(I^*).

Fig. 7. The waveforms of continuously changed I^* during one sampling period.

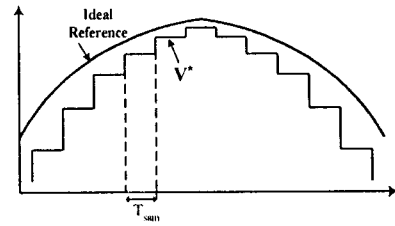


그림 4. 고정된 전압 레퍼런스(V^*). (T_{sam} : sampling period)

Fig. 4. The waveforms of Fixed voltage reference (V^*).

본 시뮬레이션을 수행하기 위한 조건은 다음과 같다. 컨버터는 150W 전력정격과 100KHz의 스위칭 주파수를 갖는다. 또한 본 시뮬레이션은 그림 9에 보여지고 있는 일사량 조건하에서 수행되었다.

그림 8에 보여지고 있는 아날로그 샘플러가 태양광 패널의 개방회로 전압을 샘플링 한다. 이 샘플링 시간은 100us 이고 이 기간동안 MPPT 컨버터의 스위치는 반드시 턴-오프 되어야만 한다. 샘플링 주기는 10ms 이다. 이 샘플링주기 동안 샘플링된 개방회로 전압의 약 76%의 값이 전압제어루프의 레퍼런스 값으로 Hold circuit내에서 일정하게 유지된다. 이 전압제어루프의 출력이 전류제어루프에 대해 한 샘플링 주기 동안에 연속적으로 가변되는 전류 레퍼런스(I^*)를 생성한다. 그림 10(a)는 기존 방식의 한 샘플링주기 동안에 가변되지 않는 전압 레퍼런스(V^*)를 나타내는 반면, 그림 10(b)는 제안한 개선된 최대전력 점 추적 방식의 한 샘플링주기 동안에도 매 스위칭 시마다 연속적으로 가변되는 전류 레퍼런스(I^*)를 나타내고 있다. 이러한 파형들은 그림 4와 7에서 보여지고 있는 이론적인 파형들과 매우 잘 일치 하고 있다.

그림 11(a)와 (b)는 각각 기존 방식과 제안한 최대전력 점 추적 방식의 이상적인 출력 전력 및 추적된 출력 전력의 파형을 보이고 있다.그림 12(a)와 (b)는 각각 기존 방식과 제안한 최대전력 점 추적 방식의 평균 출력전력(P_{avg})을 나타내고 있다. 그림 11과 12로부터 알 수 있듯이 제안한 방식은 기존 방식에 비해 부하로 전달하는 출력을 약 9%이상 증가 시켰음을 알 수 있다.

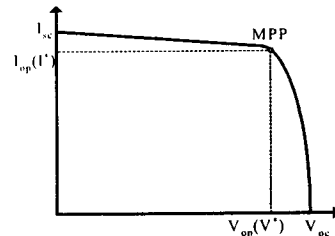


그림 6. 태양광 모듈의 최대전력 점에서의 V_{op} 와 I_{op} .

Fig. 6. V_{op} and I_{op} at MPP of PV-module.

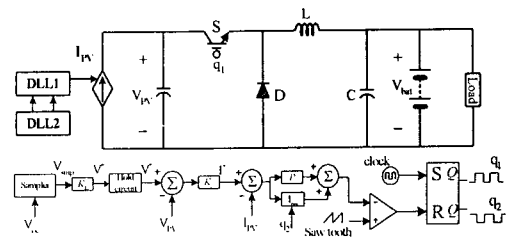


그림 8. 제안한 MPPT 컨버터의 전체 회로구성도.

Fig. 8. The overall configuration of the proposed MPPT converter.

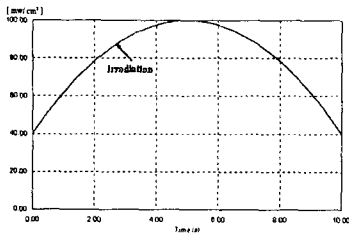
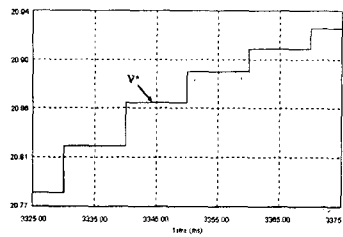
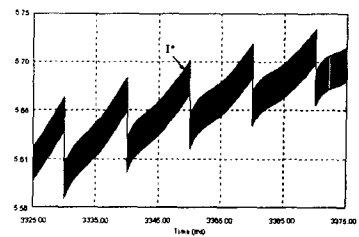


그림 9. 일사량 조건.

Fig. 9. The conditions of irradiation.

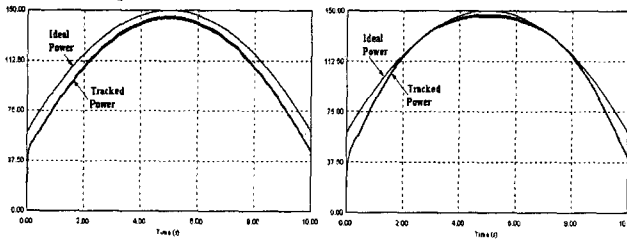


(a) Unchanged reference voltage (V^*)



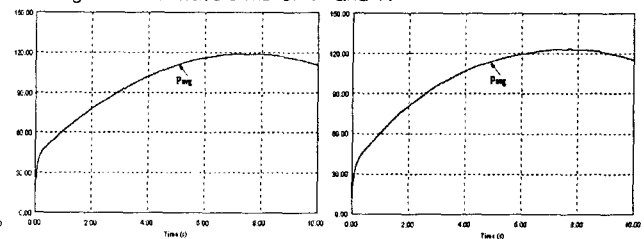
(b) Changed reference current (I^*)

Fig. 10. The waveforms of V^* and I^* .



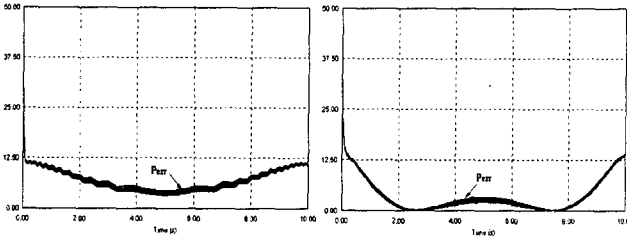
(a) The conventional MPP tracking method (b) The proposed MPP tracking method
그림 11. 이상적인 출력 전력과 추적된 출력 전력.

Fig. 11. The waveforms of the ideal and the tracked output power.



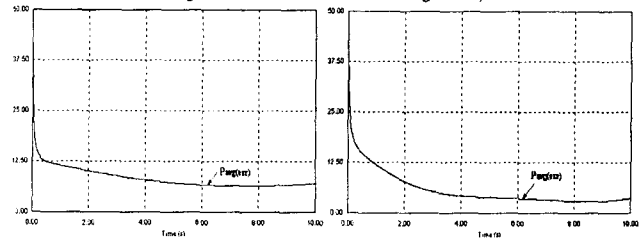
(a) The conventional MPP tracking method (b) The proposed MPP tracking method
그림 12. 평균 출력전력.

Fig. 12. The waveforms of average out power.



(a) The conventional MPP tracking method (b) The proposed MPP tracking method
그림 13. 이상적인 출력과 추적된 출력 사이의 오차 전력.

Fig. 13. The waveforms of error power between the ideal and the tracked output power.



(a) The conventional MPP tracking method (b) The proposed MPP tracking method
그림 14. 평균 오차 전력.

Fig. 14. The waveforms of average error power.

그림 13(a)와 (b)는 각각, 기존 방식과 제안한 최대전력 점 추적 방식의 이상적인 출력 전력과 추적된 출력 전력 사이의 오차 전력(P_{err})을 나타낸다. 그림 14(a)와 (b)는 각각, 기존 방식과 제안한 최대전력 점 추적 방식의 평균 오차 전력($P_{avg(err)}$)의 파형을 나타내고 있다. 그림 13과 14로부터 알 수 있듯이, 제안한 방식은 기존 방식에 비해 오차 전력이 매우 감소되었다. 따라서 태양광 패널의 이용률을 상대적으로 증가시킬 수 있을 것으로 사려 된다.

5. 결론

본 논문에서는 소규모 태양광 발전시스템에 적합한 전류보상기법을 갖는 개선된 최대전력 점 추적시스템을 제안 하였다. 제안한 방식의 개념 및 동작원리가 상세히 설명되고 있다. 또한 제안한 전류보상을 갖는 MPP 추적 시스템의 이론적 추론의 타당성이 시뮬레이션에 의해 검증되었다. 그 결과, 제안한 최대전력 점 추적 방식은 기존 방식에 비해 출력전력이 약 9%정도 증가 되었다. 따라서 태양광 모듈의 이용효율이 상당히 증가될 것으로 사려 된다. 뿐만 아니라, 본 방식은 DSP를 사용하지 않기 때문에 비교적 단순한 제어회로 구성 및 저 비용 등의 장점을 갖는다. 따라서 본 논문에 제안한 최대전력 점 추적방식은 저 전력, 저 비용의 태양광 발전 시스템에 적합할 것으로 사려 된다.

참고문헌

[1] C.R Sullivan and M.J.Powers., "A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 574-580, 1993.
[2] K.H.Hussein, I.Muta, T.Hoshino and M.Osakada., "Maximum

photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *IEE-Proceeding Generation, Transmission and Distribution.*, vol. 142, pp. 59-64, Jan. 1995.

[3] Chihchiang Hua and Chihming Shen., "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system", *IEEE-PESC. Conf. Rec.*, vol. 1, pp. 86-93, 1998.
[4] 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, Jan. 2001.
[5] Yeong-Chau Kuo, Tsong-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, June. 2001.
[6] T.Noguchi, S.Togashi and R.Nakamoto., "Short current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system", *IEEE Trans. Ind. Electronics.*, vol. 49, pp. 217-223, Feb. 2002.
[7] H.Matsuo and F.Kurokawa., "New solar cell power supply system using a boost type bidirectional DC-DC converter", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 31, pp. 51-55, Feb. 1984.
[8] J.H.R.Enslyn and D.B.Snyman., "Combined low-cost, high-efficient inverter, peak power tracker and regulator for PV applications", *IEEE Trans. Power Electronics.*, vol. 6, pp. 73-82, Jan. 1991.
[9] D.B.Snyman and J.H.R.Enslyn., "Simplified maximum power point controller for PV installations", *IEEE Photovoltaic Specialists Conf. Rec.*, pp. 1240-1245, 1993.
[10] J.H.R. Enslyn, M.S.Wolf, D.B.Snyman and W.Swiegers., "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", *IEEE Trans. Ind. Electronics.*, vol. 44, pp. 769-773, Dec. 1997.
[11] K.M.Smedley and S.C'uk., "One-cycle control of switching converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 10, pp. 625-633, Nov. 1995.