최대 전력 평형/불평형 경계점 제어를 이용한 MPPT제어에 관한 연구

論 文
55B-1-6

A Study on MPPT Control using the Maximum Power Balance/Unbalance Boundary Point Control

高 康 熏* · 姜 兌 炅** · 李 鉉 雨† · 禹 靖 仁***
(Kang-Hoon Koh · Tae-Kyeng Kang · Hyun-Woo Lee · Jung-In Woo)

Abstract : This paper proposes a simple MPPT control scheme of a based Current-Control-Loop system that can be obtains a lot of advantage to compare with another digital control method, P&O(Perturbation and Observation) and IncCond(Incremental Conductance) algorithm, that is applied mostly a PV system. An existent method is needed an expensive processor such as DSP that calculated to change the measure power of a using current and voltage sensor at the once. Therefore, it is applied a small home power generation system that required many expenses. But, a proposed method is easy to solve the cost reduction and power unbalance problems that it is used by control scheme to limit error of a current control of common sensor. This proposed algorithm had verified through a simulation and an experiment results on battery charger using PIC that is the microprocessor of a low price.

Key Words : Simple MPPT, PV System, Limit Error, PIC, Low Price

1. 서 론

현대 사회는 다양한 정보기기 및 보다 풍요로운 생활을 영위하기 위한 가전기기 사용의 증가로 인하여 전기에너지 소비가 급증하고 있다. 그러나 화석연료의 고갈이나 환경오염 문제에 대한 규제 또한 국제적으로 강화되고 있으며 클린에너지, 신재생에너지 보급 및 표준화를 위한 국제 활동이 활발히 이루어지고 있다. 일반가정 발전설비 시스템 가운데 태양광 발전시스템은 연료전지나 풍력발전설비에 비하여 발전시 발생되는 노이즈가 작으며, 관리 비용 등에 있어서 많은 이점이 있어 가장 많이 사용되고 있다.

태양광 발전시스템은 태양전지의 외부온도, 일사조건, 부하상태 등에 따라서 최대전력이 변동하는 비선형적인 특성을 가지고 있다. 그러므로 항상 최대전력점추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking)기법을 적용하여야 한다.

또한, 주택용 태양광 발전시스템은 태양전지 출력의 유효적인 활용을 위해 최대전력점 추미제어는 빼놓을 수 없는 기능이다.

기존 MPPT방법은, 기본적인 전력정보를 취득하기 위하여, 태양전지단자 또는 부하단자의 전압·전류를 검출해서, 입·출력전력을 연산·제어 후 최대전력점을 추종하는 방법인 P&O(Perturbation and Observation), IncCond(Incremental Conductance)가 대표적인 방법이다. 그 이외 제어기법 단순화와 비용저감을 위하여 아날로그 미분기를 사용한 제어방법, Fuzzy와 Neural Network를 이용한 알고리즘 제어방법 등을 적용한 연구보고가 있다[1]-[3].

이러한 연구의 최종목표는 시스템의 간소화와 다양한 분야에 응용이 가능한 시스템 개발에 있다. 시스템의 간소화로는 센서리스 시스템, 저가의 제어기 등이 있으며 다양한 응용에 있어서 대체에너지 전반(풍력, 플라이휠, 연료전지 등)에 적용 가능한 시스템 개발에 목적을 두고 있다[4][5].

본 연구에서는 기존 발표된 전력변환단 2단의 리미터 사이클 방식[6][7]을 개선한 전력변환단 1단 리미터 사이클 MPPT 제어기를 개선한 시스템을 제안하였다[8]. 전력변환단 2단의 리미터 사이클 MPPT(Limit cycle Maximum Power Point Tracking : 이하 LCMPPT로 표기)경우 인버터의 전류제어루프를 이용하여 시스템을 제어하여야 하기 때문에 전력변환단 1단 및 센스리스 시스템 적용이 곤란하단 점이 있었다. 그러나 전력변환단 1단의 LCMPPT제어기는 배터리 충전장치와 같은 1단 시스템 및 센스리스 시스템에 적용이 가능하다. 본 논문에서는 설계된 MPPT 제어기를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 효용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 전력변환단 2단 LCMPPT

그림 1은 기존에 제안된 방식을 나타낸 것이다. 이 방식은 태양전지의 전압, 전류의 검출을 필요로 하지 않기 때문에 과거와 현재에 있어서 전력의 비교동작을 필요로 하지 않기 때문에 제어회로가 간단하다. 태양전지는 단자전압 V_{array}가 변화하여도

† 교신저자, 正 會 員 : 慶南大學 電子電氣工學部 敎授 · 工博
E-mail : lhwoo@kyungnam.ac.kr
* 正 會 員 : 慶南大學 電子電氣工學部 講士 · 工博
** 正 會 員 : 慶南大學 電子電氣工學部 碩士課程
*** 正 會 員 : 東亞大學 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2005年 8月 12日
最終完了 : 2005年 12月 15日

전압오차ε_v 값으로써 PI연산 제어로 얻어진 승압초퍼의 듀티비 지령 d*로서 초퍼의 스위치를 제어함으로써 항상 직류 링크부의 전압 값 V_{link}가 일정하게 유지된다.

d*는 V_{array}가 최적동작전압 V_{opt}가 되도록 결정 되지만, 태양전지의 최적동작전압은 태양전지의 설계 값보다 크면 안 되므로 일정 값의 리미터 사이클 탐색 폭을 설정해줌으로써 탐색속도를 개선 할 수 있다.

한편, 삼상 인버터에 주어진 전원전류진폭지령 I^*_{peak}에 따라서 순시 전류제어가 이루어짐으로써 MPPT 동작이 이루어진다.

I^*_{peak}를 단위량 변화시키기 위해 요구되는 시간 T_i를 적분기의 입력으로 정의값 $(1/T_{iu})$ 을 주게 된다면 I^*_{peak}는 그 2와 같이 서서히 증가하게 된다. 이때 조건으로는 등가시정수 τ_π보다 적분기 정수 T_{iu}값이 크지 않으면 안 된다.

반대로, V_{link}보다 오차 값이 크게 되는 경우는 적분기 부의 입력 값으로 T_{id}를 주어 급격히 감소되도록 하는 방법으로 MPPT제어가 이루어진다.

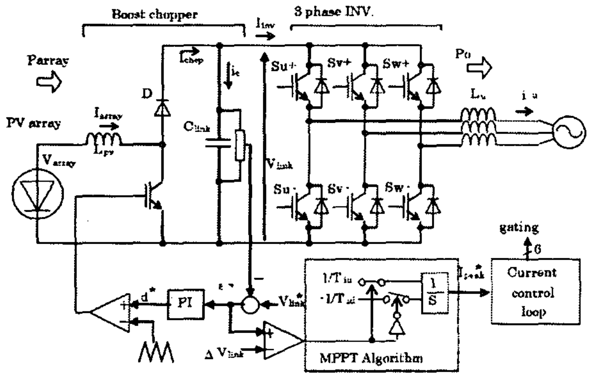


그림 1 기존의 제안시스템

Fig. 1 Existing proposed system

그러나 이 방식은 입력 V_{link}의 전압을 이용하며 인버터의 전류를 제어하는 전력변환단 2단 방식으로 제어함수가 다소 복잡하며 인버터가 요구되지 않는 시스템의 적용은 곤란하게 된다. 따라서 전력변환단 1단방식의 제어기 설계가 필요하다.

2.2 제안하는 전력변환단 1단의 LCMPPT

2.2.1 동작원리

그림 3은 제안하는 1단방식의 LCMPPT제어기 회로도를 나타낸 것이다. 주회로는 태양전지, 승압초퍼, 제어를 위한 전류센서, 충전 산화-납(Lead-acid) 배터리, 하단의 제어부는 PI제어기와 리미터 사이클 발생부로 구성되어 있다.

기준전류와 배터리 충전전류에 의해 얻어진 에러값 ε_i는 PI 제어기를 통하여 스위치 오프 듀티 지령비 d*를 출력한다. 스위치 오프 듀티 d*는 태양전지의 최적동작전류 I_{mpp}가 되도록 승압초퍼를 제어한다.

이와 동시에 전류제어루프에서 얻어진 에러값은 리미터 사이클 발생회로를 통하여 충전전류 제어값 I_{bat_ref}를 증가 시키게 된다. 기존의 리미터 사이클 발생조건과 동일하게 천천히 출력전력이 증가되어 태양전지의 동작점은 최대전력점에 도달한다.

이 점에서 좀더 I_{bat_ref}를 증가시켜 출력전력을 증가시키려고 하면 전력의 공급 평형이 깨지게 되어 초퍼의 출력전류 I_{bat}는 급격히 저하한다. 이 현상에 의해 I_{bat}가 급격히 저하되어 듀티비 지령 오프듀티 d*는 1로서 포화되어 스위치는 항상 온상태가 되어 단락상태가 된다. 이와 동시에 동작점은 급격히 원점($V_{array}=P_{array}=0$)에 도달한다. 따라서 동작점이 I_{mpp}에에 가깝게 도달한 경우에 I_{bat}가 급격히 저하하도록 하는 것을 막는다면 전력을 최대전력점에서 동작시킬 수 있다. 이것을 정의하면, 최대 전력 평형/불평형 경계점을 제어하는 것으로 일정한 리미터 값에 의해 제어되어 리미터 된 값이 일정한 주기를 가지고 동작하도록 하기 때문에 리미터 사이클 제어라 한다.

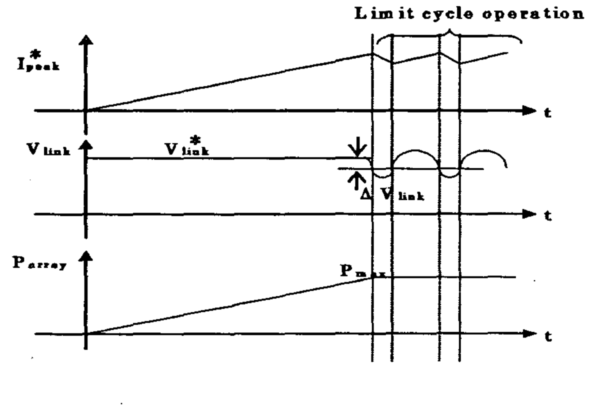


그림 2 전력변환단 2단의 LCMPPT 동작

Fig. 2 LCMPPT operation for two stage power conversion system

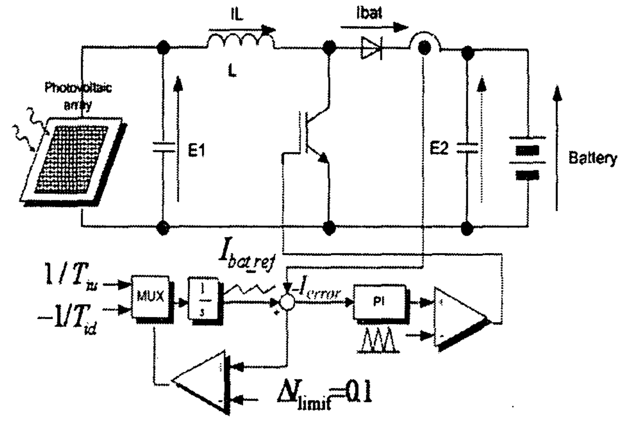


그림 3 LCMPPT 제어기 회로도

Fig. 3 The circuit of LCMPPT controller

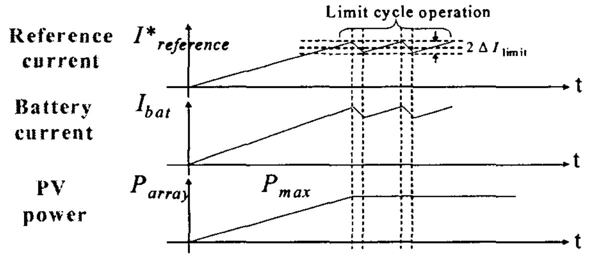


그림 4 LCMPPT의 동작 파형

Fig. 4 Operating waveform of LCMPPT

2.2.2 전력변환단 1단의 LCMPPT 동작 조건

그림 3을 보면 I_{bat}의 전류는 제어 오차 ε_i로서 PI 연산에 의해 얻어진 초퍼의 스위치 오프 듀티비 지령 d*로 피드백 제어함으로써 일정 값으로 제어된다. 본 시스템은 입출력 전력 평형으로 동작된다. 즉, $P_{out} < P_{array}$의 경우에 태양전지의 출력전력 P_{array}는 여유가 있으므로 P_{out}의 변화시정수에 의해 I_{bat}는 일정 값이 유지되며 PI제어 루프의 등가시정수 τ_π가 짧다면 초퍼부의 PI 연산에 의해 $\varepsilon_i \cong 0$로 유지된다. 전류지령치인 I_{bat_ref}를 단위량 변화시키기 위해 요구되는 시간 T_{iu}는 적분기 정의 입력 값이 되며 그림 5와 같이 천천히 증가하게 된다. τ_π와 적분정수 T_{iu}의 사이에는 식(2)의 조건이 성립되어야 한다.

$$\tau_\pi < T_{iu} \tag{2}$$

식(2)가 성립되지 않는 경우 전류 지령치 I_{bat_ref}의 증가되는 속도에 비례하여 PI 제어루프의 응답이 느려지게 되고 요구되는 전력을 초퍼에 공급할 수 없으며 I_{bat}가 저하된다. 또한, 이것을 검출하여 리미터 사이클 동작이 시작되면 최대전력점인 P_{max}에 도달하기 전에 리미터 사이클 동작이 발생한다.

즉, $T_{iu} < \tau_\pi$가 되는 경우 최대전력점이 아닌 점에서 리미터 사이클이 발생되고, 이 때 I_{bat}는 단락전류에 가까운 값이 되기 때문에 최대출력전력 P_{max}를 얻을 수 없다.

한편, $P_{out} > P_{max}$가 되면 공급전력 P_{array}는 여유가 없기 때문에 공급 평형이 무너지게 되고 I_{bat}는 급격히 저하여 전류오차 값ε_i도 역시 급격히 증가한다. 따라서 $\varepsilon_i > \Delta I_{limit}$의 경우 I_{bat_ref}를 단위량 변화시키기 위해 요구되는 시 T_{id}를 적분기부의 값으로 주게 되면 그림 4와 같이 급속히 감소된다. 이때, PI제어 루프의 등가시정수 τ_π와 적분정수T_{id}의 사이에는 식(3)의 관계식이 성립하도록 적분 시정수 T_{id}를 선택해야 할 필요가 있다.

$$T_{id} < \tau_\pi \tag{3}$$

식(3)이 만족하는 경우 전류 지령치 I_{bat_ref}가 감소하는 속도에 비례하여 PI제어 루프의 응답속도가 빨라지기 때문에 초퍼의 오프 듀티비가 급속히 0으로 포화되어 I_{bat}는 개방상태가 되어 P_{array}는 0으로 된다.

이와 같이 태양전지의 최대공급전력을 넘는 점에서 전력공급의 평형이 무너지기 전에 I_{bat}를 일정하게 유지하는 것이 가능하다면 정상상태를 유지할 수가 있다. 즉 최대 전력 평형/불평형의 경계점에서 리미트 사이클 동작시키는 것에 의해 최대전력점을 추종할 수 있다. 여기에서 최대전력 P_{max}를 얻기 위한 리미터 사이클 조건으로서는 식(2), (3)의 조건을 동시에 성립하여야 한다.

$$\therefore \text{ 리미터 사이클 발생조건 : } T_{id} < \tau_\pi < T_{iu} \tag{4}$$

3 시뮬레이션 및 시험결과

3.1 PSIM 시뮬레이션 결과

그림 5는 전력변환단 1 단방식의 LCMPPT제어기와 승압초퍼의 시뮬레이션 회로도를 나타낸 것이다. 전체시스템 구성은 태양전지 모델, 승압초퍼, 배터리 모델, 태양전지단의 전력, 전압, 전류 측정단, 저역통과 필터, 리미터 사이클 발생부, 디지털 PI제어부로 구성되어 있다. 태양전지 모델은 Visual C++를 이용하여 만든 DLL을 PSIM의 DLL블록과 링크시켰다. PI제어기와 리미터 사이클 발생부의 파라미터 값들은 PIC 내부 프로그램에 적용하기 위하여 디지털 PI제어기와 디지털 적분기를 이용하여 설계하였다.

표 1은 최대일조조건의 경우를 A, 최대일조조건의 40%의 경우를 B로 하여 나타낸 것이다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값들을 나타낸 것으로 실험과 동일한 파라미터 값을 적용한다.

그림 6은 표1에 나타낸 일사량 조건 A와 B로서 시간 2[s]마다 A-B-A로 일사량이 변화 된 경우를 PSIM 4.1에 의해 시뮬레이션 한 결과이다. 그림에서 일사조건 변화에 따라서 최대 전력점 추종이 정상적으로 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

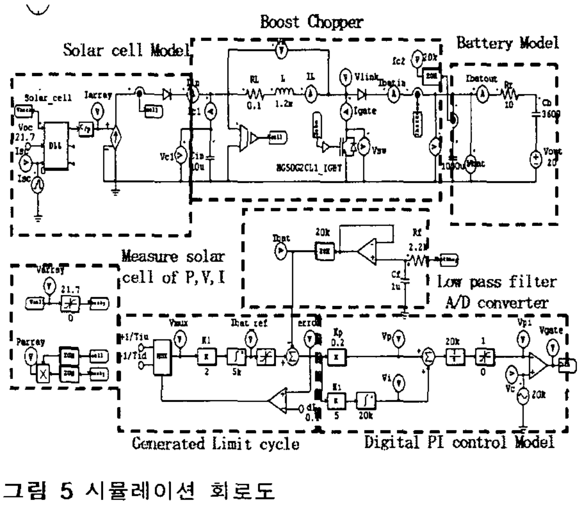


그림 5 시뮬레이션 회로도

Fig. 5 Simulation circuit

그림 7은 일사조건 A, B의 경우, 리미터 사이클 동작 파형을 나타낸 것으로 리미터 사이클 주기 T = 0.201[s]로 동작하고 있다. 일사량의 변화에 따라 입력전류의 리플은 변동이 있으나 V_{array}의 V_{rip-p}는 표 2와 같이 설계값 2.5[V]를 만족하고 있다. 또한 ΔI_{limit}=0.1[A] 이하의 값으로 동작하며 입력전류 리플은 $\Delta I_{array} = \Delta \frac{I_{bat}}{d}$ 수식을 만족하고 있다. 이때 리미터 사이클 주파수는 약 5[Hz]이다.

그림 8은 최대일사량 100[%]에서 10[%]까지 변동하도록 한 경우 V_{array}-I_{array}의 특성곡선을 나타낸 것이다. 최대일사량의 15[%]이하 일 때 점점 리미터 사이클 변동 폭이 커지게 되고 $\Delta v = 2.5$[V]설계한 값 이상이 됨으로 제어동작이 안정적하지 못함을 알 수 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

일조조건	A	B
개방전압	21.7[V]	19.7[V]
단락전류	3.45[A]	1.45[A]
최적동작전압	17.4[V]	15.8[V]
최적동작전류	3.15[A]	1.23[A]
최대전력	55W	19.43[W]

표 2 실험 파라미터

Table 2 Experimental parameters

명칭	값	명칭	값
ΔI_{limit}	0.1[A]	I_{rip-p}	0.15[A]
Kp	0.2	Δv	2.5[V]
L	1.2[m]	Tid	1[ms]
Tiu	200[ms]	T	20.1[ms]
τ_{pi}	1.7[ms]	τ_{pilow}	1.875[ms]

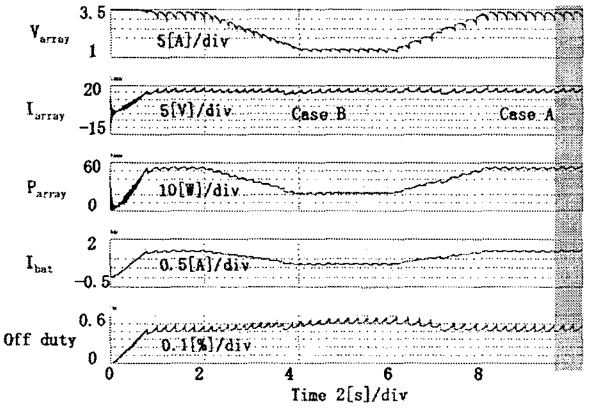
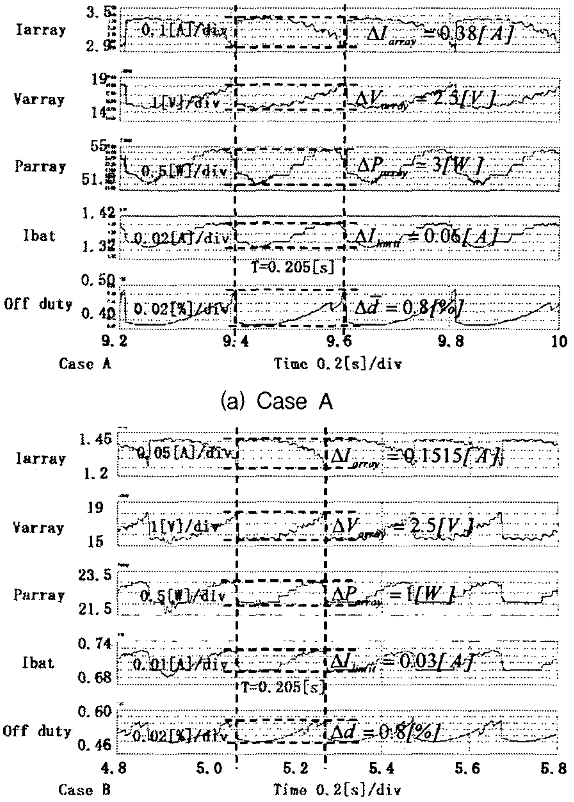


그림 6 일사조건 변화시 LCMPPT 동작 파형

Fig. 6 LCMPPT operating waveform at changed insolation condition

3.2 실험 결과

그림 9는 실험회로도, 그림 10은 PIC16F877A의 프로그램 순서도를 각각 나타낸 것이다. 프로그램 동작순서로서는 먼저, 제어기의 전원이 입력되면 A0 포트를 AD 입력 포트로 설정한다. 그 다음 입력된 AD값을 평균화하여 프로세서 내부 초기값 I_{bat}^{*}와 비교한다.



(a) Case A

(b) Case B

그림 7 일사조건에 따른 LCMPPT 동작 파형

Fig. 7 LCMPPT operating waveform by Insolation condition

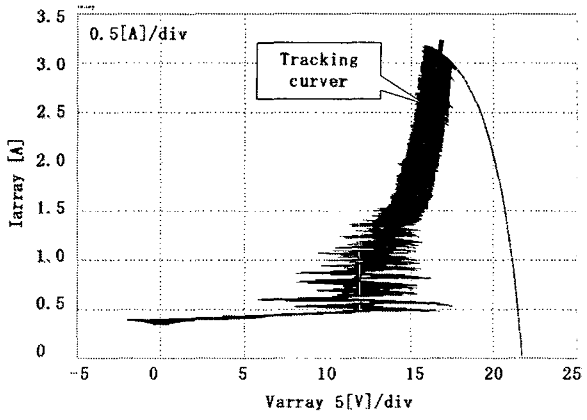


그림 8 V_{array}-I_{array} 특성곡선

Fig. 8 Characteristic curve of V_{array}-I_{array}

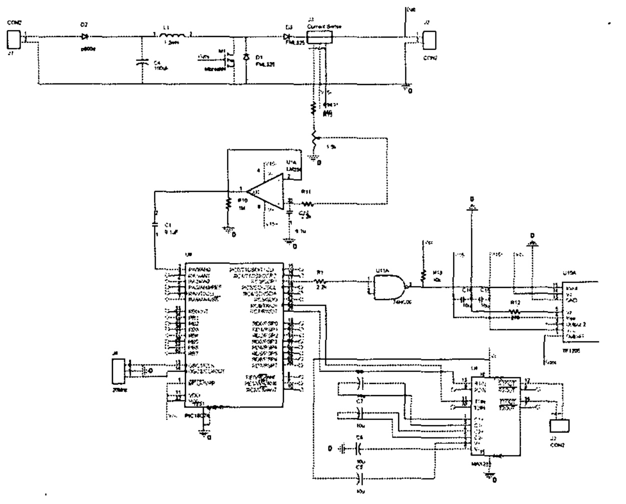


그림 9 시스템 회로도

Fig. 9 System circuit

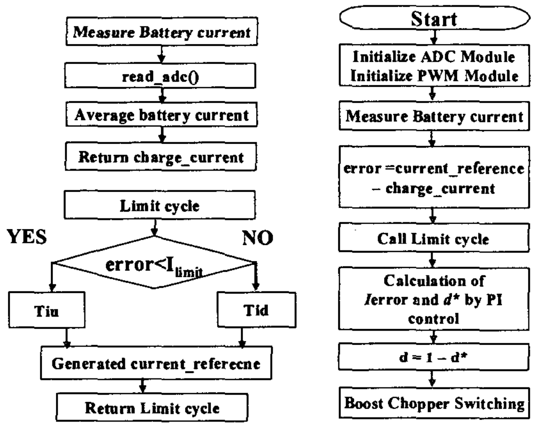


그림 10 LCMPPT제어기의 순서도

Fig. 10 Fflowchart of LCMPPT controller

비교결과로 얻어진 에러값 ε_i를 사용자 정의 함수인 리미터 사이클 발생 함수 limit()에 입력하여 충전전류 제어값 I_{bat}^{*}가 얻어진다. 또한, 생성된 값을 PI연산시켜 스위치 오프 듀티 $\bar{d}$가 얻어지게 된다. 다시 이 값은 사용자 함수인 PWM발생함수인 PWM_100()에 입력되어 [%]값으로 변환되어 PWM1 port로 출력되어 스위치 온 듀티 로 스위칭 하게 된다.

표 2에서 설정한 값들을 PIC내부의 파라미터 값으로 사용하였으며, 그림 11은 5[s]의 주기로 솔라 어레이 시뮬레이터(HP, E4351B, 4[A], 480[W])로서 일조 조건의 변화를 주었을 경우 각부 동작파형을 나타낸 것이다.

그림 12는 표 1의 일사량 변동시의 동작 파형을 나타낸 것으로 일사조건과 리미터 사이클 동작주기(약 5[Hz])는 영향이 없다는 것을 알 수 있으며, 입력되는 태양전지 전압의 전압진폭의 변동 폭은 설계 값 $\Delta v = 2.5$[v]를 만족하고 있다.

그림 13은 V_{array}에 대한 I_{array}, P_{array}의 추적궤적을 나타낸 것으로 앞서 설명한 특성곡선의 궤적과 동일한 특성을 확일 할 수 있었다.

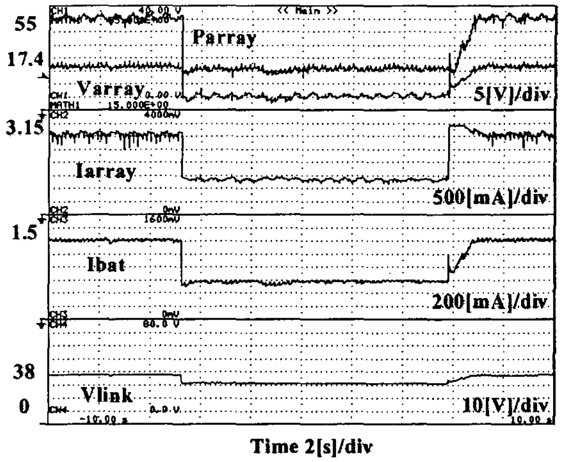
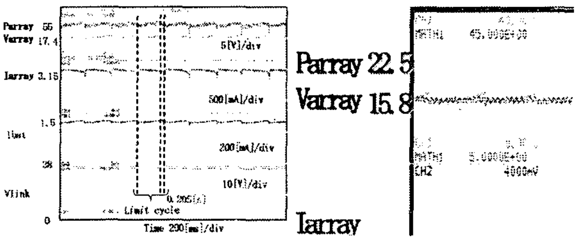


그림 11 LCMPPT동작파형

Fig. 11 LCMPPT operating waveform



(a) Case A (b) Case B

그림 12 일사조건에 따른 LCMPPT 동작 파형

Fig. 12 LCMPPT operating waveform by Insolation condition

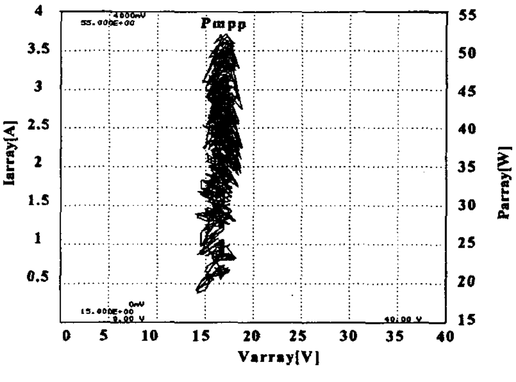


그림 13 일사량 변동에 따른 동작궤적

Fig. 13 Operation trajectory by changed insolation

4. 결 론

본 논문은 새롭게 제안한 전력변환단 1단 방식의 LCMPPT 제어기를 설계하고 분석하였다. 이 시스템은 정상적으로 전력 평형/불평형의 경계점에서 리미터 사이클 동작하도록 함으로써 태양전지의 전압과 전류 검출에 필요한 센서나 부가적인 연산이 필요하지 않는 간단한 제어회로로 승압초퍼를 제어함으로써 항상 MPPT동작 한다는 것을 시뮬레이션 및 실험으로써 확인하였

다. 또한, 제안한 시스템은 전류추종제어기법이기 때문에 전압제어에 비하여 추종속도가 빠르며 부하 변화에도 빠른 응답 특성을 가지고 있다. 또한, 저가의 제어기와 센서리스 시스템 구성이 가능하여 다른 대체에너지 시스템적용이 가능하다. 아울러, 부분그늘에 대한 대책으로 각 어레이에 시스템 적용시 저가의 시스템 구현이 가능하다.

아울러 인버터를 결합한 경우 부가적인 센서 없이 인버터단의 입력전류 제어가 가능하기 때문에 센서리스 MPPT동작이 가능하다.

향후 전력변환단 2단의 시스템 및 부분그늘에 대하여 본 시스템 적용시 특성을 분석하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

이 논문은 산업자원부의 전력산업고급인력 해외연수지원에 의해 연구 되어진 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] Hannes Knopf,, "ANALYSIS, SIMULATION, AND EVALUATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING(MPPT) METHODS FOR A SOLAR POWERED VEHICLE", MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, Portland state university, 1999.

[2] Jun Youn Ahn, Jong Hoo Park, B.H.Cho, K.J.Yoo, "Analog MPPT for connected single-phase system", KIPE conference, pp.785-788, 2003.7.

[3] 小島 知也, 松井, "出力電流のみで追從する太陽光發電システムにおける瞬時最大電力制御",平成16年電氣學會産業應用部門大會, pp.I199-I200, 2004.3.

[4] Sachin Jain, Vivek Agarwal, "A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaic Systems", IEEE POWER ELECTRONICS LETTERS, VOL. 2, NO.1, pp. 16-19, 2004.3.

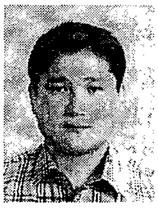
[5] Mohammad A.S. Masoum, Hooman Dehbonei, and Ewald F.Fuchs, "Theoretical and Experimental Analysis of Photovoltaic Systems With Voltage-and Current-Based Maximum Power-Point Tracking", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 17, NO.4, pp. 514-522, 2002.12.

[6] M.Matsui, T.Kitano and DH.Xu, "A Simple Maximum Photovoltaic Power Tracking Technique Utilizing System Inherent Limit Cycle Phenomena", IEEE-IAS 2003Annual Meeting Conf. Rec., pp.2041-2047, 2003.10.

[7] M.Matsui, D.H.Xu, L.Y.Kang and Z.Q.Yang, "Limit cycle based simple MPPT control scheme for a small sized wind turbine generator system - Principle and experimental verification-.", IEEE-IPEMC 2004 Conf. Proceedings, pp.1746-1750, 2004. 8.

[8] 高康熏, 大內, 松井, 北野, "電流制御ループ內の誤差信号に基づく簡易MPPT制御器とバッテリ充電器への応用",電氣學會半導体電力変換硏究會SPC-05-8, pp.47-52, 2005.1

저 자 소 개



고 강 훈(高 康 熏)

1970년 8월 14일생, 1997년 경남대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 2004년 경남대학교 전기에너지 절약연구센터 연구원, 2005년 동경공예대학 객원 연구원.

Tel : 055-249-2834, Fax : 055-248-2228

E-mail : vwgo@kyungnam.ac.kr

강 태 경(姜 兌 炅)

1978년 11월 20일생, 2004년 경남대학교 전기전자공학부 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업예정(석사), 현재 웅진 코웨이 재직.

Tel : 055-249-2834, Fax : 055-248-2228

E-mail : taekong0@hanmail.net

이 현 우(李 鉉 雨)

1953년 4월 28일생, 1979년 동아대학교 전기공학과 졸업, 1984년 영남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동아대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1993년 오사카 공대 객원 연구원, 현재 경남대학교 전자전기공학부 교수 및 중앙인사위원회 비상임 위원.

Tel : 055-249-2635, Fax : 055-248-2228

E-mail : lhwoo@kyungnam.ac.kr

우 정 인(禹 靖 仁)

1941년 2월 12일생, 1963년 한양대 전기공학과 졸업, 1978년 영남대 대학원 전자공학과 졸업(석사), 1984년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1970년~1979년 부산공업대 전기공학과 조교수, 1979년~현재 동아대 전기공학과 교수.

Tel : 051-200-7734, Fax : 051-200-7743

E-mail : jiwoo@mail.donga.ac.kr