

초퍼 없는 태양광 발전시스템을 위한 새로운 최대전력점 추적 알고리즘

李相庸*, 崔海龍, 高再錫, 姜秉熹, 李明彥, 崔圭夏

A Noble Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic System without Chopper

Sang-Yong Lee, Hae-Ryong Choi, Jae-Seok Gho, Byoung-Hee Kang,
Myung-Un Lee, and Gyu-Ha Choe

요 약

계통연계형 태양광 발전시스템은 계절별 전력수요의 변동이 많은 경우에 침투전력 삭감의 한 방안으로 고려된다. 본 시스템의 발전효율을 증가시킬 수 있는 방법으로는 근본적으로 태양전지 자체의 변환효율을 증가시키는 방법과 제어관점에서 일사량과 태양전지 표면온도에 따라 시시각각 변하는 태양전지의 최대출력점에 시스템의 동작점을 추종하게 하는 최대 전력점추적 (Maximum Power Point Tracking, 이하 MPPT) 기법을 들 수 있고 발전 효율을 높이기 위하여 자주 사용되어 왔다. 초기 투자비용을 줄이기 위해 후에 등장한 직류초퍼를 사용하지 않고 MPPT 기능을 구현하는 태양광 발전시스템의 경우에 MPPT 알고리즘은 기존의 방법들을 사용하였고 직류초퍼를 사용하지 않은 태양광발전시스템에 적합한 MPPT 알고리즘의 연구는 없었다. 따라서 직류초퍼를 사용하지 않은 태양광 발전시스템에 적합한 MPPT 알고리즘의 연구가 요구되며 본 논문에서는 초퍼 없는 계통연계형 태양광발전 시스템을 대상으로 기존 MPPT 알고리즘의 문제점을 밝히고 이를 해결할 수 있는 새로운 MPPT 알고리즘을 연구하였다.

ABSTRACT

The photovoltaic systems with solar cell array provide electrical energy to the utility/consumers, which are becoming one of the promising energy substitutes. The photovoltaic system can be classified into two types : One is the stand-alone type, and the other utility interactive one. The latter can return the generated power to the utility, but the former can't. The utility interactive systems are so valuable for peak power cut in summer season. In the photovoltaic systems the maximum power point tracking (MPPT) has been studied for the increase of the generating energy of the photovoltaic system. There are many control methods of MPPT, but a new MPPT algorithm is proposed to overcome the disadvantages of the conventional ones, and as a result the proposed method enables to improve both tracking ability and generating efficiency of photovoltaic system without DC chopper.

Key Words : MPPT, PV system, PV array, UIPVS

1. 서 론

*삼성전기(주) 연구원
E-mail : ghchoe@konkuk.ac.kr
접수일자 : 2001. 7.16
1차심사요청일 : 2001. 7.23 2차심사요청일 : 2002. 2.21
심사완료일 : 2002. 3.27

태양광 발전시스템은 계통과 연계 유무에 따라 크게 계통연계형과 독립형으로 구분되고 계통연계형(UIPVS : Utility Interactive Photovoltaic System)은 잉여전력을 전원계통으로 반환할 수 있으므로 배터리가 불필요

하여 구조가 간단한 장점을 가지며 또한 계절별 전력 수요의 변동이 많은 경우에 침투전력 삭감방안의 하나가 된다^[1].

지금까지, 최대의 출력을 얻기 위한 방법으로는 태양전지 표면온도 및 일사량에 따라 시시각각 변하는 태양전지의 최대출력점에 시스템의 동작점을 추종하게 하는 최대전력점 추적 (MPPT: Maximum Power Point Track) 기법이 사용되어 왔다. 이러한 기법은 주로 MPPT 알고리즘을 구현하기 위한 각종 직류초퍼의 구성 및 제어기법에 중점을 두어 연구되었다. 그러나 직류초퍼를 사용하지 않는 태양광 발전시스템의 경우에는 별도의 기법이 개발되지 않고 정전압 기법이나 기존 제어알고리즘을 사용해 왔다^[2-6].

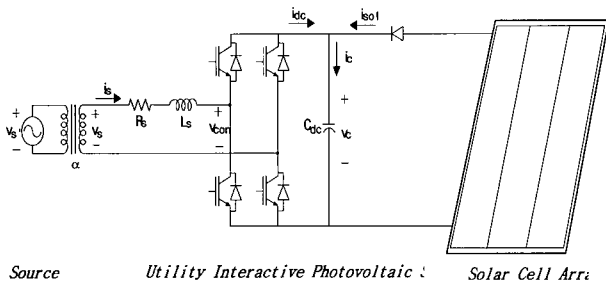
결국 기존의 MPPT 알고리즘을 초퍼 없는 계통연계형 태양광발전시스템에 적용할 경우 추종실패를 일으키게 된다. 따라서 초퍼 없는 태양광발전시스템에 가장 적합한 MPPT 알고리즘을 위해 본 연구에서는 기존 MPPT 알고리즘의 문제점을 우선 분석하고 이를 해결할 수 있는 새로운 MPPT 알고리즘을 제안하고 이의 해석 및 분석을 수행하였다.

2. 계통연계형 태양광 발전시스템

2.1 PV 시스템 구성^[2]

그림 1과 같이 본 연구에서 제안한 태양광 발전시스템은 직류초퍼를 사용하지 않는다. 따라서 C_{dc} 는 태양전지의 동작점 규정을 위한 전압원 역할을 하면서 동시에 AC/DC 컨버터의 일부분이 되어 필터의 기능을 수행한다. 그리고 AC/DC 컨버터는 MPPT 알고리즘에 의해 전압 지령치를 가변하는 가변 전압제어를 하여야 한다.

이 토폴로지는 초퍼 및 관련 제어부가 없어 저 가격이며 소형, 저 중량이고 직류초퍼를 제어하지 않기 때



Source Utility Interactive Photovoltaic : Solar Cell Arr:

그림 1 직류 초퍼 없는 연계형 태양광 발전시스템
Fig. 1 Choperless utility interactive PV system

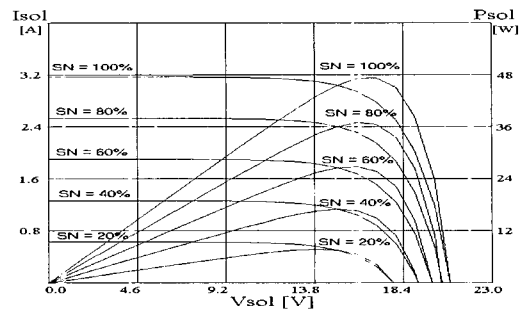


그림 2 일사량 변화에 의한 태양전지 출력특성
Fig. 2 PV cell output characteristics with varying radiation

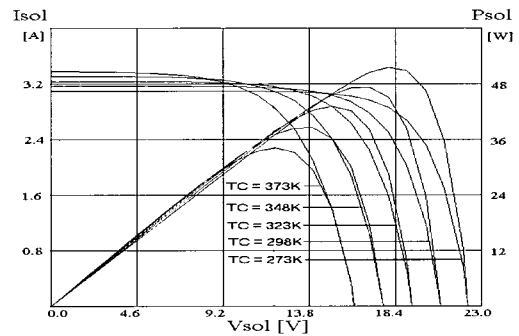


그림 3 표면온도 변화에 의한 태양전지 출력특성
Fig. 3 PV cell output characteristics with varying surface temperature

문에 제어루프가 단순하며 초퍼 스위칭에 의한 손실이 없기 때문에 상대적으로 효율이 높은 특징을 갖는다^[2].

단점으로는 필연적으로 발생하는 직류단의 리플로 인해 그에 비례하는 태양전지 출력의 감소가 예상된다. 그러나 이러한 출력의 감소분은 리플저감을 목적으로 커패시터 용량을 크게 설계함으로써 줄일 수 있어 그 영향은 실제 적다고 할 수 있다. 본 연구에서는 직류초퍼 없는 토폴로지를 대상으로 별도의 MPPT 알고리즘을 사용하여 정확한 제어와 출력의 증대를 얻고자 한다.

2.2 태양전지 출력특성

그림 2는 일사량 변화에 의한 태양전지 출력특성을 보인 것으로서 일사량 증가 시 태양전지 출력전류가 증가하여 출력상승을 가져오는 것을 알 수 있다.

그림 3은 태양전지 표면온도 변화에 의한 태양전지 출력 특성을 보인 것으로서 온도 감소 시 전압이 증가하여 출력상승을 가져오는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2, 3에서 일사량의 변화는 태양전지 최대출력점 전

류에 표면온도 변화는 최대출력점 전압에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 MPPT 알고리즘은 일사량과 표면온도의 변화에 따라 가변하는 태양전지의 최대출력점을 추정하여 전압지령치로 출력하는 동작을 한다.

3. MPPT 알고리즘

3.1 기존의 MPPT 알고리즘

대표적인 MPPT 방식으로는 정전압제어법, 비선형 함수 계산법, Perturbation & Observation 법(이하 P&O법), Incremental Conductanc 법(이하 IncCond 법)등을 들 수 있는데 P&O법과 IncCond법이 가장 많이 쓰이는 방법이며 P-V의 기울기에 의해 제어하는 방법이다. 실제 많은 연구에서 IncCond법이 P&O법 보다 향상된 알고리즘임을 실험으로 입증하고 있으며 특히 일사량의 변동이 심한 경우에 P&O법 보다 적합한 알고리즘으로 알려져 있다.

3.2 기존 MPPT 알고리즘의 문제점

기존의 MPPT 알고리즘 중 본 연구의 비교 대상으로 삼고 있는 P&O 법과 IncCond 법의 가장 큰 문제점은 기본적으로 일사량이 일정하다는 가정에서 만들어진 알고리즘이라는 것이다. 실제 일사량은 매순간에 가변하고 있으며 이것은 기존 MPPT 알고리즘에서 추종 실패를 가져오는 원인이 된다. 만약 일사량 변화에 비해 긴 MPPT 주기, 또는 작은 지령치 전압 변동폭을 가진다면 MPPT 주기 또는 지령치 전압 변동폭 ΔV 와 일사량 변동폭의 관계에 따라 추종 가능성 여부가 정해지며 다음과 같이 설명할 수 있다.

그림 4의 곡선 S_1 에서 동작점 A는 MPPT제어가 정상적인 경우 P_{max1} 을 향해 이동되어야 한다. 그러나 일사량이 변하여 S_1 -- S_2 -- S_3 로 그 특성이 달라지고 있다고 할 때 동작점 A가 B, C로 점차 이동함에 따라 전압의 감소와 함께 출력이 증대되어 마치 곡선 S_1 의 오른쪽 부분에서 P_{max} 점으로 이동되는 것으로 제어 알고리즘 상에서 잘못 인식될 수 있다. 이를 최대전력점을 기준으로 좌측면과 우측면으로 나누어 설명한다면 다음과 같다.

그림 4의 좌측면의 경우에 최초 전압을 하강시켜 점 A에서 B로 이동할 때 전압감소를 출력의 증가로 판단하므로, 기존의 MPPT 알고리즘은 최대전력점의 반대 방향으로 전압 지령치를 변동시키게 되며 이 순간 추종 실패라고 할 수 있다. 그림 4의 우측면은 일사량 증가시의 또 다른 예로서 최초 전압 변동이 최대전력

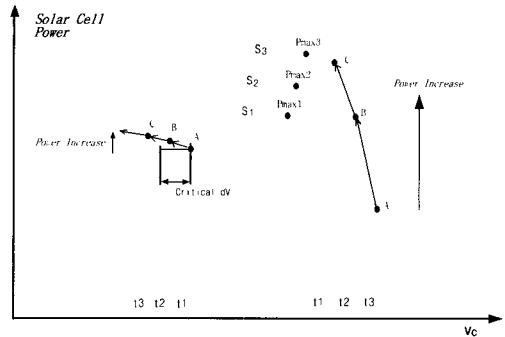


그림 4 일사량 상승시 기존의 MPPT 알고리즘 동작
Fig. 4 Operation of conventional MPPT algorithm for increased insolation

점을 향하고 있을 경우이다. 우측면의 경우 최대전력점까지 추종동작을 하게되나 최대전력점 도달이후에는 그림 4의 좌측면과 같은 추종실패를 보이게 된다. 이때 추종과 추종실패의 경계가 되는 전압변동폭 dV 가 존재하고 전압변동폭 dV 는 일사량의 변화폭의 함수여서 특정 수치로 규정 지을 수 없다. 일사량이 감소할 때에도 마찬가지로 이러한 추종실패는 발생하게 된다. 이러한 추종실패의 문제를 방지하는 방안으로 고정폭 P&O 법을 바탕으로 현재 출력과 전압, 전류에 각각 약 0.8 정도의 여유를 두어 그 범위 안에서만 변동하도록 하여 연속적인 추종실패를 막는 연구가 있었으나 근본적인 해결방안이 될 수 없다.

4. 제안 MPPT 알고리즘

먼저 MPPT 제어 한 주기 동안 일사량 증감 방향은 일정하며 태양전지 표면온도의 변동은 없고 전압 리플은 유사 정현파이며 전압리플 범위에서 P-V 곡선은 동일 기울기를 가진다는 가정이 필요하다.

이러한 가정에서 한 주기 동안의 전압 리플 구간을 그림 5와 같이 $V_c + V_r$ 부터 $V_c - V_r$ 라 하고 전압 리플 범위에서 P-V 곡선을 일차 함수($P = aV + b$)로 근사화한다.

$$V(t) = -V_r \cos t + V_c \tag{1}$$

$$P(V, t) = aV(t) + bt \tag{2}$$

따라서 그림 5와 같은 직류단 전압리플 1주기에 대하여 식 (1)과 (2)로 표현 가능하다. 이때 각 미분 값을 식 (3), (4)와 같이 쓸 수 있고 식 (4)를 식 (3)에

대입하면 식 (5)와 같이 전압변동과 출력의 변화에 대한 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{dP(V, t)}{dt} = a \frac{dV(t)}{dt} + b \tag{3}$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = V_r \sin t \tag{4}$$

$$\therefore \frac{dP(t)}{dt} = aV_r \sin t + b \tag{5}$$

결국 P-V 곡선의 기울기는 식 (6)과 같이 표현할 수 있는데 이 식에서 우변의 우항은 그림 6과 같은 1 주기 대칭 파형이므로 결국 P-V 기울기의 리플 한 주기 동안의 평균은 a 가 된다.

$$\therefore \frac{dP(t)}{dV(t)} = a + \frac{b}{V_r \sin t} \tag{6}$$

또한 작은 V_r 에서 P-V의 기울기 값이 출력의 변동치에 민감함으로서 발생하는 오차의 영향을 줄이기 위해 일정주기동안 여러 기울기 값을 평균 내어 사용하는 것이 바람직하다. 새로운 MPPT 알고리즘은 초퍼를 사용하지 않은 방식의 단점이 되는 직류단 전압 리플을 역이용하여 향상된 MPPT 동작을 수행토록 하며 매 제어주기에서 계산된 P-V의 기울기를 일정 MPPT 주기동안 평균값으로 구하고 이 값의 부호를 확인하면 실제 태양전지 출력특성 곡선의 증감방향을 추종실패 없이 계산할 수 있다. 즉 새로운 MPPT 알고리즘은 매 제어주기마다 P-V의 기울기를 계산하여 MPPT 제어 한 주기 내에서 평균값을 찾아내는 방법이며 본 논문에서는 33[msec]의 MPPT 주기로 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

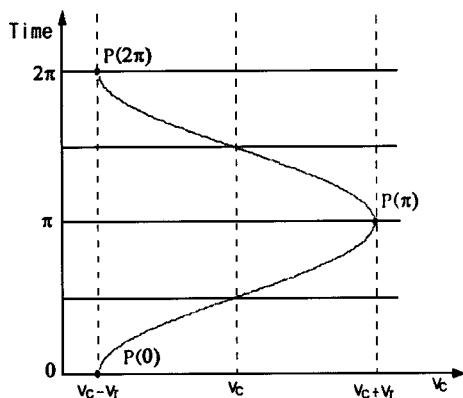


그림 5 직류단 커패시터 전압리플
Fig. 5 Ripple voltage at DC capacitor

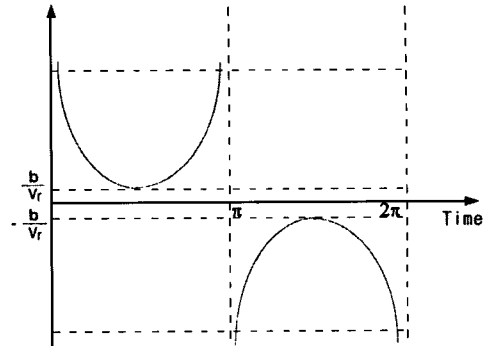


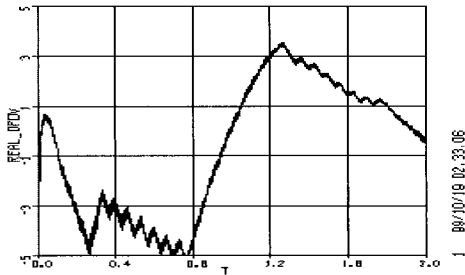
그림 6 $b / (V_r \sin t)$ 의 그래프
Fig. 6 Graph for $b / (V_r \sin t)$

5. 시뮬레이션

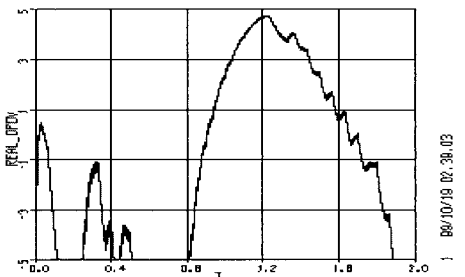
시뮬레이션 프로그램은 ACSL을 사용하였으며 디지털 제어기상의 제어주기는 10kHz로 하였다. 시뮬레이션의 비교 대상은 고정폭 P&O 법과 가변폭 P&O 법 그리고 고정폭 IncCond 법이다. 최대 출력점에 도달하면 실제 P-V 곡선의 기울기 값은 영이 되며 최적의 추종 동작을 하고 있을 때 동작점은 항상 최대전력점에 위치할 것이므로 시뮬레이션 결과의 정량적인 판단 기준은 P-V 곡선 기울기 dP/dV 의 영점을 기준으로 한 분산을 구하여 판단한다. 또한 태양전지 표면온도는 변동량이 미소하다고 가정하고 298. K (25. C)로 하였으며 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation Condition

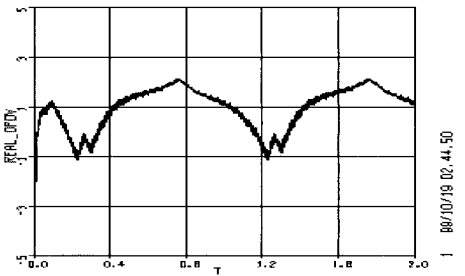
Total PV output	3 [kW]
PV module	50 [W]
PV array구성(직렬회로×병렬회로)	20 × 3
전원전압 (1차측)	220 [V]
전원전압 (2차측)	140 [V]
직류단 커패시터	7050 [μF]
입력단 인덕터	2 [mH]
입력단 등가 저항	0.6 [Ω]
고정폭 전압 변동시 전압 변동폭	3 [V]



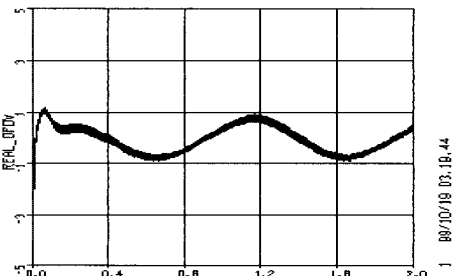
(a) 고정폭 P&O 법(기존방식)



(b) 가변폭 P&O 법(기존방식)



(c) 고정폭 IncCond 법(기존방식)



(d) 제안한 MPPT 알고리즘

그림 7 정현파 일사량의 경우 최대전력점에서의 dP/dV (일사량 $SN=50+10\sin(2\pi t)$ [%])

Fig. 7 dP/dV at maximum power point in varying sinusoidal insolation

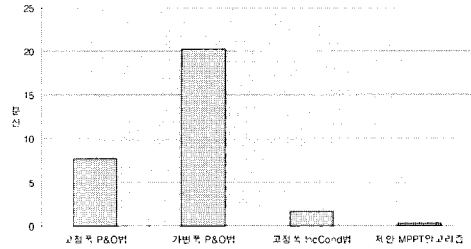


그림 8 알고리즘별 분산치 비교

Fig. 8 Comparison variance of dP/dV

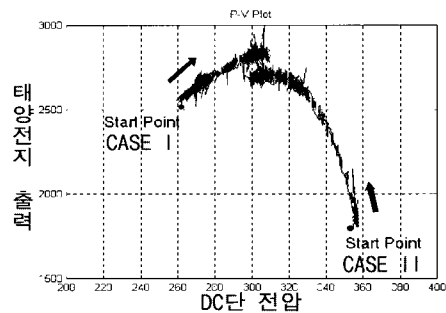


그림 9 실험에 의해 MPPT동작을 나타내는 P-V 곡선

Fig. 9 Experimental P-V curve showing MPPT

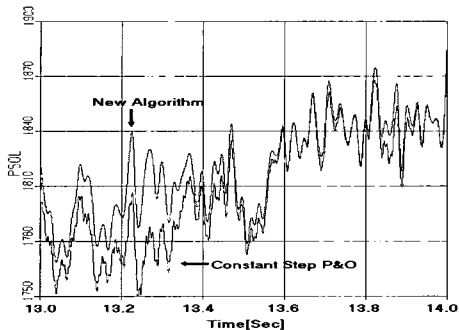
그림 7은 일사량을 정현파 형태로 섭동을 준 경우 dP/dV를 MPPT 알고리즘별로 나타내었다. (a), (b) 및 (c)는 기존의 제어방식으로 최대전력점에서의 dP/dV가 일사량 변동에 따라 각각 7.68 22.22 및 1.67의 분산값을 보이고 있다. 반면에 (d)의 제안된 방식의 경우 dP/dV의 분산은 0.28로 작은 분산값을 보인다.

그림 8에 이들 분산값을 그래프로 나타내었으며 제안된 방식이 가장 작은 분산치를 보였다. 이것은 동일한 일사량변동에 대해서 정확한 최대전력점 추종이 수행됨을 보이는 것이며 전지가 더욱 효율적으로 이용됨을 의미하는 것이다.

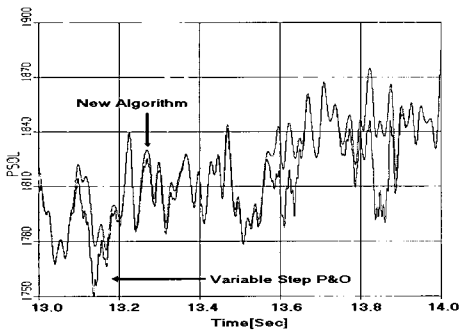
6. 실험 및 고찰

실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 고찰하였다. 시스템의 사양은 표 1의 시뮬레이션 조건과 동일하고 DSP를 이용하여 제어알고리즘을 구현하였다.

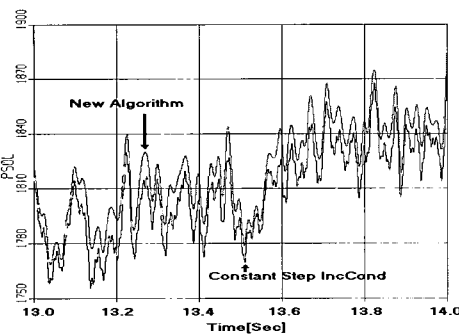
그림 9는 제안된 알고리즘의 최대전력점 추적동작을 보여준다. Case I은 낮은 전압에서 시작되었을 경우 최대전력점으로 출력이 상승하는 P-V 커브이다. Case II는 반대로 높은 전압에서 시작되었을 때 최대전력점으로 수렴해 감을 보여준다.



(a) 제안된 알고리즘과 고정폭 P&O 법 출력비교



(b) 제안한 알고리즘과 가변폭 P&O 법 출력비교



(c) 제안한 알고리즘과 고정폭 IncCond 법 출력비교

그림 10 실제일사량에 의한 알고리즘별 성능비교
Fig. 10 Performance comparison proposed algorithm with conventional one using real insolation

최대출력점이 추종방향에 따라 서로 일치하지 않음을 볼 수 있는데 이는 두 경우의 실험시에 일사량 변동이 발생했기 때문이다.

MPPT 동작의 정확성은 파형의 관측만으로는 어렵고 따라서 실험결과로 일사량을 산출한 후 실제 일사량 변화를 고려한 시뮬레이션을 통하여 판단하였다.

그림 10은 실험결과 중 전반적으로 출력의 상승구간

에서 각 알고리즘을 비교한 것이다. 세로축은 태양전지 출력이고 가로축은 시간축이다. (a), (b) 및 (c)의 그림에서 제안된 알고리즘의 출력이 기존의 알고리즘보다 높은 출력을 내고 있음을 볼 수 있으며, 제안된 알고리즘에 의한 출력이 약 3[%] 크게 얻어졌다.

7. 결 론

본 연구에서는 계통연계형 태양광 발전시스템에 있어서 기존 MPPT 알고리즘의 일사량 변화시 최대전력점 추종실패 문제를 해결할 수 있도록 직류초퍼가 없는 계통연계형 태양광 시스템의 단점중 하나인 직류단커패시터 전압리플을 역이용하여 새로운 MPPT 알고리즘을 제안하였다.

실험을 위하여 단상 계통연계형 태양광 발전시스템을 제작하고 DSP로 제어하였으며 실험결과 정상적인 MPPT 동작을 수행함을 확인하였다.

즉 새로운 MPPT 알고리즘은 직류초퍼를 사용하지 않은 토폴로지에서 기존의 알고리즘보다 우수한 최대전력점 추종성능을 보였으며 이에 동일 기상 조건에서 태양전지의 출력이 상승하였다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소 2000년도 연구비 지원 (과제관리번호 제00-003호)에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 김홍성 "3상 계통연계 태양광 발전 시스템의 제어기 설계", 건국대학교 대학원 박사학위청구논문, 1998.
- [2] H. Dong, H. Sugimoto, "A New Utility Interactive Photovoltaic Power Conditioning System And Its Maximum Power Tracking Control", IPERC '97, pp. 238~243, 1997.
- [3] C. Hua, C. Shen, "Control of DC Converter for Solar Energy System with Maximum Power Tracking", Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation Vol. 2, 1997.
- [4] C. Hua, C. Shen, J. Lin, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 1, pp. 99~107, 1998.
- [5] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada, "Maximum Photovoltaic Power Tracking : An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric

Conditions", IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, Vol. 142, No. 1, 1995.

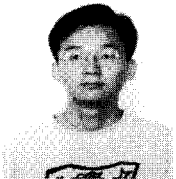
- [6] U. Herrmann, H. G. Langer, "Low Cost DC to AC Converter for Photovoltaic Power Conversion in Residential Applications", PESC '93, pp. 588~594, 1993.

저 자 소 개



이상용(李相庸)

1972년 12월 2일생. 1998년 건국대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 삼성전기(주) 연구원.



최해룡(崔海龍)

1973년 2월 8일생. 1996년 건국대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 1998년~2001년 동 대학원 박사과정. 현재 (주)아모텍 연구원.



고재석(高再錫)

1967년 6월 3일생. 1994년 건국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 1997년~2001년 동 대학원 졸업(공박).



강병희(姜秉熹)

1966년 9월 19일생. 1993년 건국대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 1995년~1998년 삼성종합기술원 정밀기계 Lab. 전문연구원. 1999년~현재 동 대학원 박사과정.



이명언(李明彦)

1960년 6월 11일생. 1983년 건국대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1993년~2001년 대양전기학원 원장. 2002년 현재 서울대 전력설비/자동화전공 겸임교수.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 Post-Doc. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 현재 건국대 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구센터 소장.