

PWM 초퍼와 전류형 인버터를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템

李 丞 桓, 成 樂 奎, 吳 鳳 煥, 金 城 南, 李 勳 九, 金 容 珠, 韓 慶 熙

A Utility Interactive Photovoltaic Generation System using PWM Chopper and Current Source Inverter

Seung-Hwan Lee, Nark-Kuy Sung, Bong-Hwan Oh,
Sung-Nam Kim, Hoon-Goo Lee, Yong-Joo Kim, Kyung-Hee Han

요 약

계통연계형 태양광발전시스템을 PWM 초퍼와 전류형 인버터로 구성하였다. 전류형 인버터의 직류리액터를 경감하는 방법으로, 직류측에 병렬공진회로를 삽입함에 따라 맥동전력의 일부를 교류 전해콘덴서에 축적하여 직류전류의 맥동을 억제하는 방법과, 초퍼의 변조파를 전원주파수의 2배로 제어하여 직류전류의 맥동을 억제하는 것을 비교 검토하였다. 그리고 태양전지전류와 초퍼의 변조율만을 이용하여 태양전지가 항상 최대출력점에서 동작하도록 하였다. 계통과 연계함으로써 출력전력이 부하전력보다 큰 경우에는 잉여전력을 계통전원에 공급하고, 발전전력이 부하전력에 대해 부족한 경우에는 계통전원이 부족분을 공급하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we compose of the utility interactive photovoltaic(PV) generation system with a PWM stepdown chopper and a current source inverter. The stepdown chopper is controlled by the several gate pulses (twice frequency of utility voltage, square pulse and without the chopper) of chopper part to reduce pulsation of DC current and size of DC reactor. PV current only is measured for maximum power point tracking without any influence on the variation of insolation and temperature. Therefore, we can control modulation factor of the chopper to operate at maximum power point of solar cell. And, the utility interactive photovoltaic generation system supplies an AC power to the load and the utility power system.

Key Words: utility interactive photovoltaic generation system, PWM stepdown chopper, current source inverter, twice frequency of utility voltage, PV current, maximum power point tracking

1. 서 론

현재 인류가 가장 많이 사용하고 있는 전기에너지는 대부분이 화력발전이나 원자력발전에 의존하고 있는 실정이며, 화력발전의 경우 화석연료의 한계성 및 지역 편중으로 인한 공급의 불안정성과 석유 사용증가로 인한 공해로 생태계와 오존층이 위협받고 있다. 또한 원자력발전의 경우 안정성 및 핵폐기물의 지구오염등 심각한 사회문제로 제기되고 있다.^[1~3]

이에 대한 대책으로 선진 각국에서는 대체 에너지 개발을 추진하고 있으며, 그 중에서도 신 에너지원으로서 무공해이며 무한한 태양에너지를 이용한 태양광발전시스템이 새로이 각광받고 있다. 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 태양전지의 출력은 일사량, 온도 등에 크게 영향을 받기 때문에 가능한 한 많은 에너지를 얻기 위해서는 태양전지의 출력을 항상 최대로 제어할 필요가 있다. 또한 태양전지의 출력특성은 직류이므로, 계통과 연계하기 위해서는 인버터를 사용

해서 직류를 교류로 변환하는 태양광발전시스템이 필수적이다. 인버터는 전압형과 전류형으로 크게 분류되지만, 전류형은 직류전류를 일정하게 하기 위해서 큰 직류 리액터를 필요로 하는 단점이 있으나, 부하단락, 인버터 사고시의 단락에 대한 돌입전류의 걱정이 없고, 계통과 연계하기 위해서 인버터의 출력전압을 계통전압 보다 높게 하지 않아도 되는 장점이 있다.^[2-4]

본 논문에서는 전류형 인버터의 직류리액터를 경감하는 방법으로, 직류측에 병렬공진회로를 삽입함에 따라 맥동전력의 일부를 교류 전해콘덴서에 축적하여 직류전류의 맥동을 억제하는 방법과, 초퍼의 변조파를 전원주파수의 2배로 제어하여 직류전류의 맥동을 억제하는 것을 비교 검토하였다. 그리고 태양전지전류와 초퍼의 변조만을 이용하여 태양전지가 항상 최대출력점에서 동작하도록 하였다. 계통과 연계함으로써 출력전력이 부하전력보다 큰 경우에는 잉여전력을 계통전원에 공급하고, 발전전력이 부하전력에 대해 부족한 경우에는 계통전원이 부족분을 공급하는 것을 확인하였다.

2. 회로구성

그림 1 (a)는 전류형 인버터를 이용한 태양광발전시스템으로 태양전지, 직류리액터, 인버터, 필터, 변압기, 부하 및 계통으로 전체 시스템을 구성하였다. 전류형 인버터는 입력전류를 일정하게 하기 위해서 큰 직류리액터를 연결하여 사용한다. 또한 변압기는 직렬임피던스 역할을 하며, 인버터 출력전압을 승강압하고, 계통과의 인터페이스를 용이하게 하기 위하여 사용하였다.

부하에 공급되는 전류를 i_o 라 가정하고, 인버터의 교류출력전류 i_a 가 역률1의 정현파로 모두 계통에 공급되는 것으로 가정한다면, 계통전압 e_u 는

$$e_u = \sqrt{2}E_u \sin \omega t \quad (1)$$

이 되며, 출력전류 i_o 는

$$i_o = \sqrt{2}I_o \sin \omega t \quad (2)$$

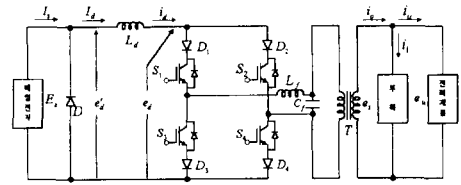
이 된다.

인버터의 변조율을 MI_i 라 하여, 변조파 ξ_i 를

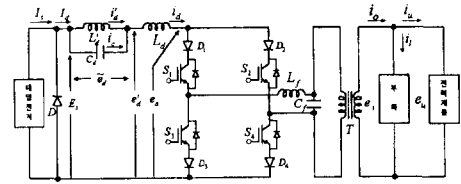
$$\xi_i = MI_i \sin \omega t \quad (3)$$

로 하고, 변압기의 권수비를 1:1라 하면, 전류형 인버터의 입력전압은

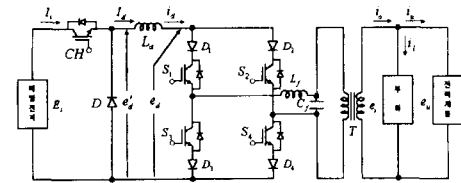
$$e_d = \xi_i \cdot e_u = \frac{MI_i \cdot E_u}{\sqrt{2}} (1 - \cos 2\omega t) \quad (4)$$



(a) 전류형 인버터



(b) 공진-전류형 인버터



(c) 초퍼-전류형 인버터

그림 1 전류형 인버터를 이용한 태양광발전시스템
Fig. 1 Utility interactive photovoltaic system using a current source inverter

이 되어 인버터의 직류측 전압이 전원전압의 2배로 맥동을 하게 된다는 것을 알 수 있다. 위식에서 첫 번째항은 직류분이고, 두 번째항은 교류분이다.

교류출력전류 i_a 는 I_d 를 변조파 ξ_i 로 PWM제어하면, PWM리플은 교류필터 L_f 와 C_f 에서 제거되기 때문에 다음과 같이 표시된다.

$$i_a = \xi_i \cdot I_d = MI_i \cdot I_d \sin \omega t \quad (5)$$

i_o 의 실효치 I_o 와 I_d 의 관계는 $\sqrt{2} I_o \sin \omega t = MI_i I_d \sin \omega t$ 로부터

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{MI_i}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

가 되고, 변조율 MI_i 에 의해서 정해진다.

그림 1 (b)는 공진-전류형 인버터를 이용한 태양광발전시스템으로서 태양전지, 병렬공진회로, 직류리액터, 인버터, 필터, 부하 및 계통으로 시스템을 구성하였다. L_d 와 C_d 는 직류리액터 L_d 를 감소시키기 위해 구성한 병렬공진회로를 나

타낸다.⁽³⁾

해석상 L_d 의 전류가 일정전류 I_d 라 하면, 직류 순시전압 e_d' 는 식 (4)와 같이 $\frac{MI_i \cdot E_u}{\sqrt{2}}(1 - \cos 2\omega t)$ 가 되며, 태양전지전압은

$$E_s = \frac{MI_i \cdot E_u}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

이 된다. 여기에서 계통전압 E_u 가 일정한 경우 MI_i 를 변화시키므로서 태양전지전압 E_s 를 가변할 수 있다.

그러므로 식 (4)와 (7)를 병렬공진회로의 교류전압 $\tilde{e}_d = E_s - e_d'$ 에 대입하면

$$\tilde{e}_d = E_s \cos 2\omega t \quad (8)$$

이 되고, L_d 에 흐르는 전류

$$i_d' = I_d + \tilde{i}_d \quad (9)$$

이며, i_d' 의 교류분은

$$\tilde{i}_d = \frac{E_s}{2\omega L_d} \sin 2\omega t \quad (10)$$

이 된다. C_d 에 흐르는 전류는

$$i_c = -2\omega C_d E_s \sin 2\omega t \quad (11)$$

이므로 공진리액터와 공진콘덴서를

$$2\omega L_d = \frac{1}{2\omega C_d} \quad (12)$$

가 되도록 병렬공진회로를 설계하면

$$\tilde{i}_d = -i_c \quad (13)$$

가 되고, 병렬공진회로 이외의 직류회로에서는 $i_d = I_d$ (일정)가 된다.

병렬공진회로의 공진주파수를 전원주파수의 2배로 조정해서 2배의 맥동에너지를 L_d 와 C_d 에서 분담한다. 이것에 의해 2배 주파수로 맥동한 직류전압 e_d' 의 맥동분을 흡수해서 직류전류 i_d 를 일정 (I_d)하게 할 수 있다.

그림 1 (c)는 강압초퍼와 전류형 인버터를 이용한 태양광발전시스템으로 태양전지, 초퍼, 직류리액터, 전류형 인버터,

필터, 변압기, 부하 및 계통으로 전체 시스템을 구성하였다. 강압초퍼는 직류리액터를 경감시키고, 최대출력점추적제어를 한다.^(4,5)

초퍼의 변조율을 MI_c 라 하여, 변조과 ξ_c 를

$$\xi_c = MI_c \sin^2 \omega t \quad (14)$$

로 하고, 초퍼의 출력전압은

$$e_d' = \xi_c \cdot E_s = \frac{MI_i \cdot E_u}{\sqrt{2}}(1 - \cos 2\omega t) \quad (15)$$

이 된다. 따라서 MI_c 를 가변하므로 초퍼의 출력전압이 가변되는 것을 알 수 있다.

직류리액터 L_d 에 걸리는 전압은

$$L_d \frac{di_d}{dt} = e_d' - e_d \quad (16)$$

가 되어, 식 (15)의 e_d' 와 식 (4)의 e_d 의 주파수를 120(Hz)로 일치시켜 전류맥동을 감소시킨다.

3. 최대출력제어

본 태양광발전시스템의 제어루프는 그림 2와 같이 태양전지(CELL), 태양전지전류만을 검출하여 최대출력점추적(MPPT)을 하고 직류리액터를 경감하기 위한 강압초퍼(BUCK CHOPPER), 태양전지의 직류전원을 교류부하와 계통에 공급하기 위한 인버터(INV), 계통과 인터페이스하기 위한 절연변압기(T), 부하(LOAD), 인버터의 출력을 계통과 위상동기를 하기 위한 위상검출기(PLL)로 구성하였다.

태양전지의 출력특성은 시시각각 변화하는 일사량과 온도에 의해서 변동한다. 또 부하상대도 시시각각 변화하기 때문에 태양전지의 최대출력점은 변하게 된다. 따라서 어떤 자연 조건하에서도 항상 최대출력점에서 동작하도록 제어할 필요

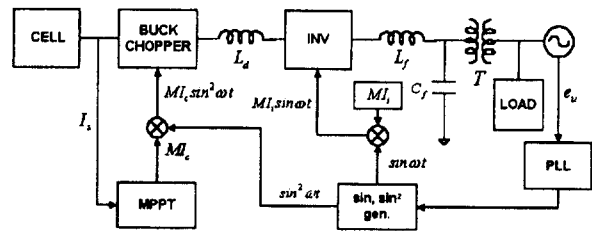


그림 2 시스템 제어루프
Fig. 2 System control loop

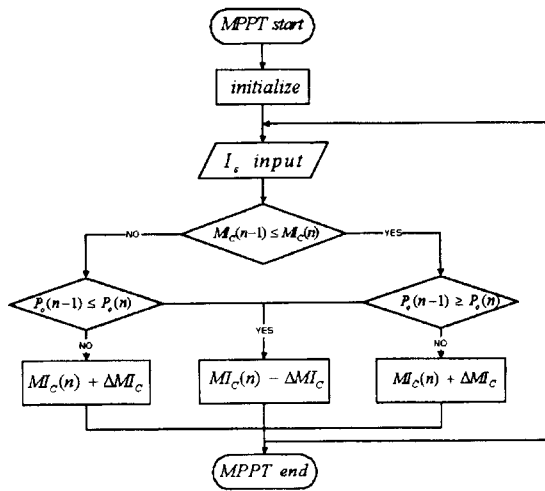


그림 3 최대출력점추적제어 흐름도
Fig. 3 Maximum Power Point Tracking(MPPT) control flowchart

가 있다.^[1,6]

그림 1 (c) 회로에서 강압초퍼의 입출력 관계식은

$$e_d = MI_c E_s \quad (17)$$

$$I_d = \frac{1}{MI_c} I_s \quad (18)$$

이 된다. 태양전지에서 계통에 공급하는 전력은 다음과 같다.

$$P_o = E_u I_o = \frac{MI_i E_u I_s}{\sqrt{2} MI_c} \quad (19)$$

계통전압 E_u 가 일정하다고 가정하고, 인버터 변조율 MI_i 를 일정하게 제어하면, 강압초퍼의 변조율 MI_c 와 태양전지 전류 I_s 에 의해서 P_o 가 최대가 되도록 제어한다.

그림 3은 최대출력점추적제어를 위한 프로그램 흐름도를 나타낸다. 변조율이 $+ \Delta MI_c$ 로 보정되고 있는 경우에는 과거 전력과 현재전력을 비교하여 현재전력이 큰 경우에는 $+ \Delta MI_c$ 를 보정하고, 현재전력이 작은 경우에는 $- \Delta MI_c$ 로 보정을 한다. 그러나 변조율이 $- \Delta MI_c$ 로 보정되고 있는 경우에는 과거전력과 현재전력을 비교하여 현재전력이 큰 경우에는 $- \Delta MI_c$ 로 보정하고, 현재전력이 작은 경우에는 $+ \Delta MI_c$ 로 변조율 보정을 하므로써 항상 태양전지의 최대출력점에서 동작할 수 있도록 추적제어를 한다.

그림 4는 이상의 이론을 확인하기 위한 제어펄스 패턴을 나타낸다. 그림 1 (c)의 초퍼부 CH를 구형파제어와 PWM제어를 하므로써 그림 1 (a)와 같이 전류형인버터만을 이용한 것

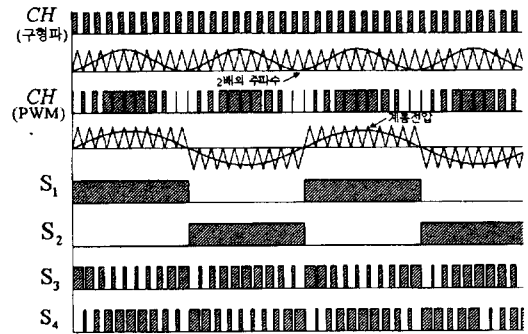


그림 4 제어펄스
Fig. 4 Control pulse

보다 직류리액터전류의 맥동을 경감시키도록 하였다. 그리고, 태양전지전류만을 검출하여 초퍼부CH를 제어하여 일사량과 부하의 변화에 관계없이 최대출력점을 추적하도록 하였다. 전류형 인버터의 펄스패턴은 전류가 연속적으로 흐르도록 데드타임없이 제어하였다.

4. 실험결과

본 논문에서는 계통전압 E_u 를 110[V]로 일정하게 하고, 캐리어 주파수는 4[kHz] 로 하였으며, 초퍼의 변조파를 계통전원의 2배로 제어(PWM), 구형파제어 하였다. 태양전지는 개방전압이 18[V] 이고, 단락전류가 3.32[A]인 것을 직병렬로 조합하여 강압초퍼와 전류형 인버터를 통해 권수비가 1:1.5 인 절연변압기로 계통과 연계하였다. 공진-전류형에서의 부하는 40[Ω], 초퍼-전류형에서의 부하는 35[Ω]으로 하였다. MI_i 의 값은 0.7~0.95 까지 가변하여 인버터의 출력을 검출한 결과 인버터의 변조파를 최대가 되도록 0.95로

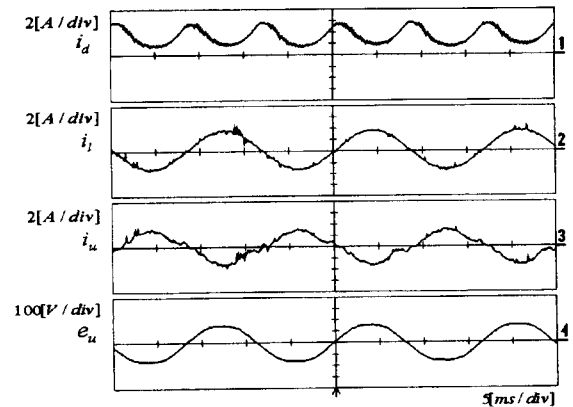


그림 5 전류형 인버터 파형
Fig. 5 Waveform of current source inverter

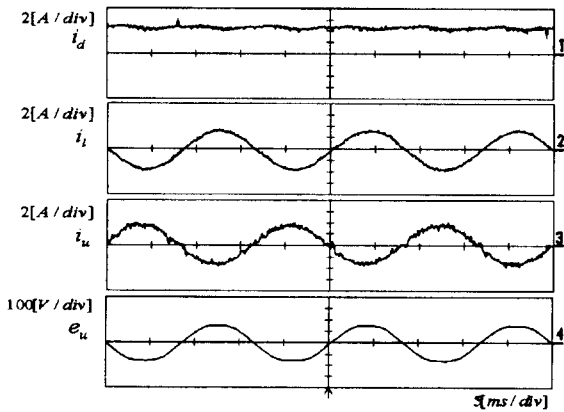


그림 6 공진-전류형 인버터 파형
Fig. 6 Waveform of resonance-current source inverter

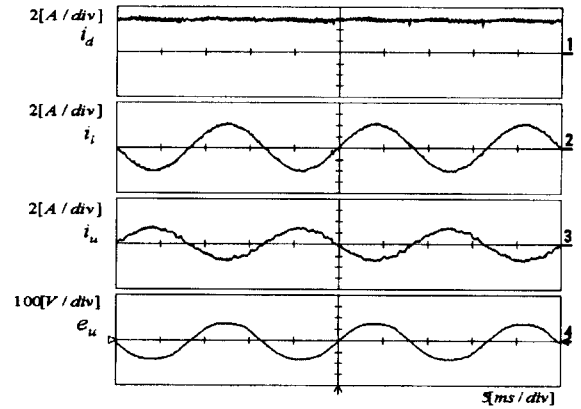


그림 8 초퍼를 PWM제어
Fig. 8 Waveform of chopper with PWM control

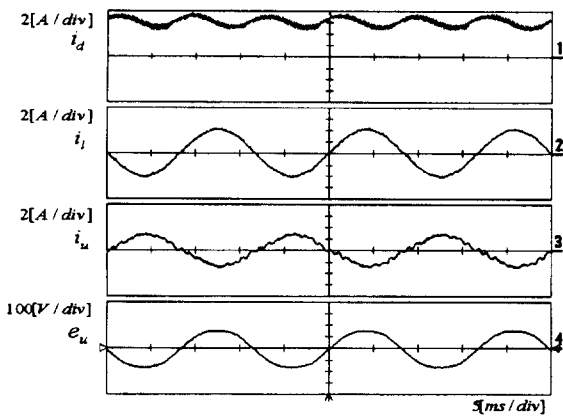


그림 7 초퍼를 구형파제어
Fig. 7 Waveform of chopper with pulse control

선정하였고, ΔMI_c 는 0.01로 하였다.

그림 5는 그림 1 (a)와 같이 계통과 연계하고 직류리액터 $L_d = 100(mH)$ 로 하였을 경우의 직류리액터전류, 부하전류, 계통전류, 출력전압파형으로 직류리액터전류가 크게 맥동함에 따라 계통전류도 왜곡되는 것으로 판단된다.

그림 6은 그림 1 (b)에서 병렬공진리액터 $L_d' = 15(mH)$ 와 공진콘덴서 $C_d = 117(\mu F)$ 을 삽입하고, 직류리액터 $L_d = 50(mH)$ 인 경우 직류리액터전류, 부하전류, 계통전류, 출력전압파형을 나타낸다. 그림 5의 전류형 인버터 파형과 비교하여 리액터의 크기를 경감하고도 직류리액터전류의 맥동이 크게 감소되고, 출력전류파형도 개선됨을 알 수 있다.

그림 7은 그림 1 (c)에서 직류리액터의 크기를 $L_d = 50(mH)$ 로 감소시키고, 강압초퍼를 구형파로 제어한 경우의 각부파형을 나타낸 것으로, 그림 5와 비교하여 직류리액터의 크기를 경감하고도 직류리액터전류의 맥동이 크게 감소됨을

확인할 수 있다.

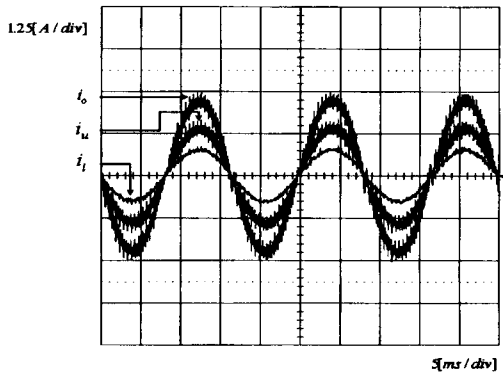
그림 8은 그림 1 (c)에서 강압초퍼의 변조파를 전원주파수의 2배(PWM)로 제어한 경우의 각부파형을 나타낸다. 그림 5의 전류형 인버터 파형, 그리고 그림 7의 강압초퍼회로를 구형파로 제어한 경우의 파형과 비교하여 직류리액터전류의 맥동이 크게 감소되므로 리액터 크기를 경감할 수 있다. 또한 계통전류파형도 개선됨을 알 수 있다

그러므로, 그림 1 (a)의 전류형 인버터회로에서는 직류리액터전류의 맥동을 억제하기 위해서는 큰 직류리액터가 필요하게 된다. 그림 1 (b)의 공진-전류형 인버터회로에서는 병렬공진회로를 추가하는 단점이 있으나 (a)의 전류형 인버터만을 이용한 것보다는 직류리액터의 용량을 경감하고, 직류리액터전류의 맥동을 저감할 수 있다. 그림 1 (c)의 초퍼-전류형 인버터회로에서는 (a)의 회로에 스위칭소자가 별도로 추가되는 단점은 있으나, 리액터전류의 맥동을 감소시킨다. 특히 초퍼의 변조파를 전원주파수의 2배로 PWM 제어를 하는 경우에는 리액터전류의 맥동이 크게 감소되므로 리액터용량을 경감할 수 있다. 그 결과 출력전류파형도 양호함을 확인할 수 있다.

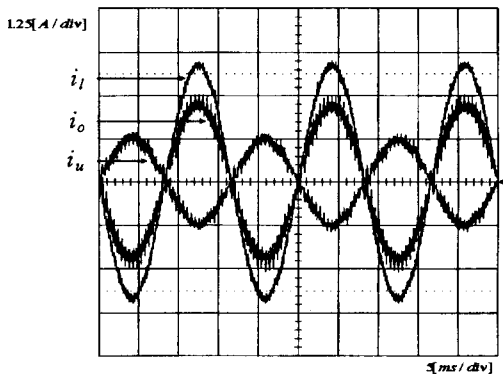
그림 9의 (a)는 계통을 연계했을 때 부하에서 요구되는 전류가 인버터 출력전류보다 작을 경우에 인버터 출력전류 i_o 가 부하에 부하전류 i_l 을 공급하고 그리고 잉여전류 i_u 를 계통에 공급하는 파형을 나타낸다. (b)는 부하에서 요구되는 전류가 인버터 출력전류 보다 클 경우 부족분의 전류를 계통에서 공급해 주는 전류파형을 나타낸다.

그림 10은 최대출력점 추적제어를 하기 위한 식 (19)에서의 초퍼 변조율, 인버터 변조율, 태양전지전류, 계통전압파형을 각각 나타낸다.

그림 11은 최대출력점 동작을 확인하기 위하여 수동으로 초퍼의 변조율 MI_c 를 변화시킨 경우의 출력전류파형이다.



(a) $i_o > i_l$ ($i_o = i_l + i_u$)



(b) $i_o < i_l$ ($i_l = i_o - i_u$)

그림 9 부하변화에 따른 전류파형
Fig. 9 Current waveform as change of load

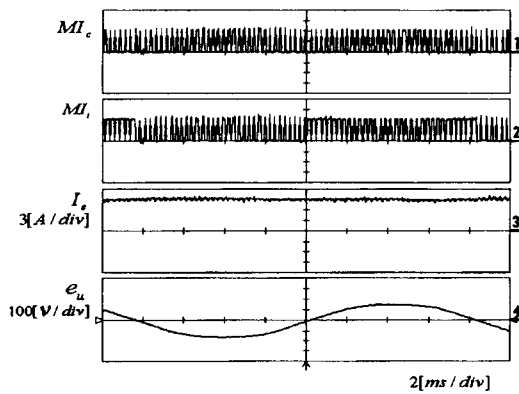


그림 10 최대출력점 추적제어시 각부파형
Fig. 10 Each waveform as MPPT

여기에서, 일사량이 일정한 경우 변조율을 가변함에 따라 인버터 출력전류의 최대값은 어느 한 부분 ($MI_c \approx 0.7$)에서 출력됨을 알 수 있다.

그림 12는 초퍼의 변조율과 태양전지의 전류만을 검출하여

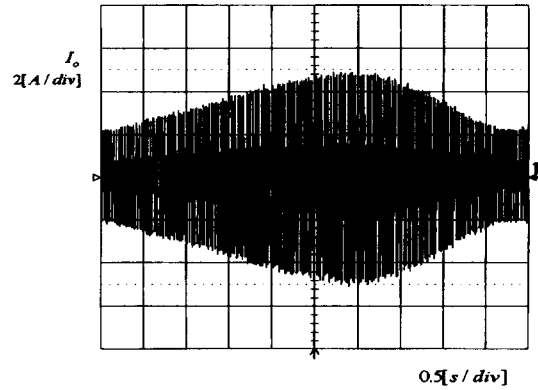


그림 11 초퍼 MI_c 변화에 따른 출력전류파형
Fig. 11 Output current waveform as change of chopper MI_c

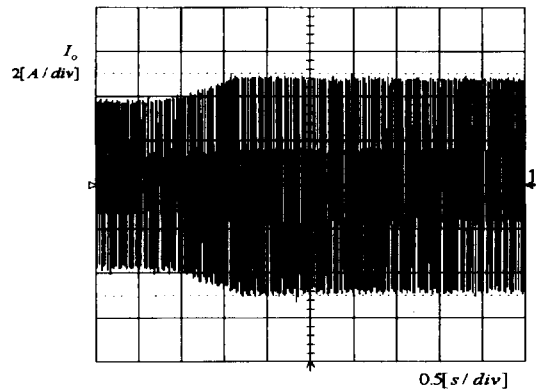


그림 12 전류검출에 의한 인버터 출력전류파형
Fig. 12 Inverter output current waveform of detect current

그림 3의 프로그램 흐름도에 의해 최대출력점추적제어를 한 경우의 인버터의 출력전류파형으로 그림 11의 출력전류의 최대값과 일치함으로 최대출력점을 추적하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 태양광발전시스템에서 직류리액터를 경감하는 방법을 제시하였다. 전류형인버터의 직류측이 계통전원주파수의 2배로 맥동하기 때문에 초퍼의 변조파를 전원전압의 2배의 주파수로 제한한 결과, 병렬공진회로를 삽입한 경우와 초퍼를 구형파제어(시비율제어) 경우보다 직류 리액터전류가 현저하게 감소함을 확인할 수 있었다. 그러므로 직류리액터용량을 경감할 수 있다. 그리고 태양전지전류만을 검출하여 초퍼의 변조율과 인버터 출력전력을 연산하여 초퍼의 변조율을 제어하므로써 태양전지가 항상 최대출력점

에서 동작하도록 하였다. 또한 본 방식에서 태양전지의 출력 전력이 부하전력보다 큰 경우에는 잉여전력을 계통전원에 공급하고, 발전전력이 부하전력에 대해 부족한 경우에는 계통전원이 부족분을 공급하는 것을 확인하였다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 鄭然澤 外, “승강압초과에 의한 태양전지의 최대출력 추적제어” 대한전기학회 논문지, Vol.43, No.11, pp.1846~1855, 1994.
- [2] 野中作太郎 외 2명, “單相PWM電流形インバータによる太陽光發電連系システム”, 電學論B, 112卷, 5, pp.439, 1992
- [3] 野中作太郎, “系統連系太陽光發電システムに適した單相PWM電流形インバータ”, 電學論D, 114卷, 6, pp.631~637, 1994
- [4] 門田行生 외 2명, “電流形インバータとDC-DCコンバータを用いた太陽光發電系統連系システム”, 電學論D, 116卷, 6, pp.718~719, 1996
- [5] 根葉保彦, 古山英二, “PWM電流形インバータによる系統連系太陽光發電システムの最大電力演算法”, 電學論D, 117卷, 9, pp.1092~1098, 1997
- [6] 한경희 외 5명, “태양전지전류에 의한 계통연계형 태양광발전시스템의 최대출력제어법”, 전력전자학술대회논문집, pp.109~112, 1998

〈 저 자 소 개 〉



이승환(李承桓)

1962년 2월 18일생. 1984년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 대덕대학 전기과 부교수.



성낙규(成樂奎)

1968년 4월 21일생. 1993년 대전산업대 전기공학과 졸업. 1995년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 명지대 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



오봉환(吳鳳煥)

1959년 9월 1일생. 1985년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1993년 4월~1997년 1월 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 현재 명지전문대학 전기과 조교수.



김성남(金城南)

1953년 9월 17일생. 1980년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 대호건설 전기부 부장. 동 대학원 전기공학과 박사과정.



이훈구(李勳九)

1948년 4월 27일생. 1971년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991~1992년 미국 아리조나 주립대학교 객원교수. 현재 용인송담대학 전기과 부교수.



김용주(金容珠)

1943년 2월 10일생. 1973년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동양공업전문대학 전기과 교수.



한경희(韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 명지대 전기·제어계측공학부 교수. 당 학회 자문위원.