

소규모 계통연계형 태양광 시스템의 최적제어에 대한 연구

황락훈, 장은성, 남우영
세명대학교

Research about most suitable control of small scale system link type photovoltaic system

L.H. Hwang, E.S. Jang, and W.Y. Nam
Semyung Univ.

ABSTRACT

The solar cells should be operated at the maximum power point because its output characteristics are greatly fluctuated on the variation of insolation, temperature and load.

The output power of solar cell is DC, therefore it is necessary to install an inverter among electric power converts. The inverter have to supply a sinusoidal current and voltage to the load and the interactive utility line.

In the paper, the proposes a photovoltaic system designed with a step up chopper and single phase PWM voltage source inverter. Synchronous signal and control signal was processed by microprocessor for stable modulation. The step up chopper operates in continuous mode by adjusting the duty ratio so that the photovoltaic system tracks the maximum power point of solar cell without any influence on the variation of insolation and temperature because solar cell has typical dropping character. The single phase PWM voltage source inverter consists of complex type of electric power converter to compensate for the defect, that is, solar cell cannot be developed continuously by connecting with the source of electric power, from 10 to 20%. The single phase PWM voltage source inverter operates in situation that its output voltage is in same phase with the utility voltage. The inverter supplies an ac power with high factor and low level of harmonics to the load and the utility power system.

1. 서 론

태양전지는 일사량, 온도와 부하에 의해 크게 변동하기 때문에 가능한 한 많은 에너지를 얻기 위해서는 태양전지의 출력을 항상 최대로 제어할 필요가 있다. 태양전지의 출력은 직류이므로 교류부하에 적용하기 위해서는 전력변환장치 중 인버터가 필수적이며 단위 역률을 갖는 정현파 전류 및 전압을 부하계통에 공급해 주어야 한다.

본 논문에서는 태양광 발전시스템을 승압초퍼와 단상 PWM 전압형 인버터로 구성하였고, 안정된 변조를 위해서 동기신호와 제어신호를 마이크로프로세서에 의해서 처리하였다. 전력비교에 따라 시비율을 변화시키지만 태양전지는 전형적인 수하특성을 갖고 있어, 일사량과 온도변화에 관계없이 항상 최대 출력점을 추적하도록 승압초퍼를 제어하였다. 단상 PWM 전압형 인버터는 태양전지가 연속 발전할 수 없는 단점을 보완하기 위해 일반상용전원과 연계함으로써 약 10~20% 전력절감효과를 얻을 수 있는 에너지절약 전원복합형 전력변환장치로 구성되어 있다. 단상 PWM 전압형 인버터와 위상동기를 위해서 계통전압을 검출하여 계통전압과 인버터 출력을 동상 운전하므로 잉여전력을 계통과 연계할 수 있게 하여 고역률과 저고조파 출력을 유지함으로써 부하와 계통이 전력이 안정하게 공급될 수 있도록 제어하였다.

2. 본 론

2.1 태양광 발전의 특성

그림 1은 광기전력효과(Photovoltaic Effect)를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다. 이상적인 경우, 광 투사시의 전압전류 특성은 식 (1)과 같이 된다.

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

이 되지만, 실제로는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 가 더해져 그림2와 같이 되고, 식(1)은

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{q(v + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{2} \quad (2)$$

가 된다. 여기서 I 는 출력전류, I_{ph} 는 광전류, I_o 는 다이오드 포화전류, n 은 다이오드 상수, k 는 볼츠만 상수이고 q 는 전자 1개의 전하이다. 이를 전압전류 특성곡선으로 나타내며 그림과 같이 된다.

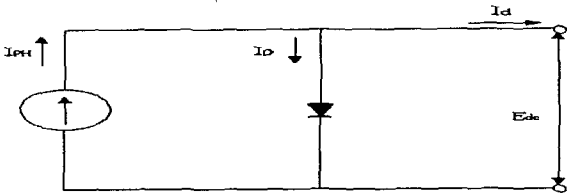


그림 1 태양전지의 회로

그림 2에서 개방전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , 곡선인자 FF(Fill Factor) 등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련되는 파라미터로서, 우선 개방전압은 식(3)이 되고

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (3)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{qIR_s}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

단락전류는 식 (4)가 되며, 곡선인자는

$$FF = \frac{(V_m \times I_m)}{(V_{oc} \times I_{sc})} \quad (5)$$

로 정의되고, 여기서 V_m 은 태양전지의 최대출력전압, I_m 은 최대출력전류이다.

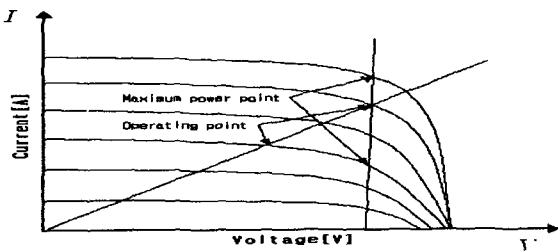


그림 2 태양전지의 전압, 전류곡선

그림 3는 일사량에 따른 태양전지의 출력의 변화를 보여주고 있으며 일사량의 변화시 태양전지의 개방전압은 큰 변화가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다.

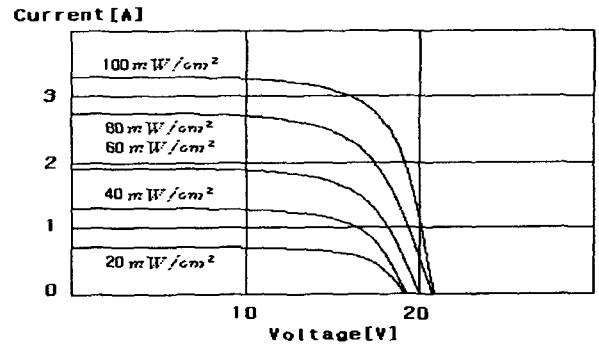


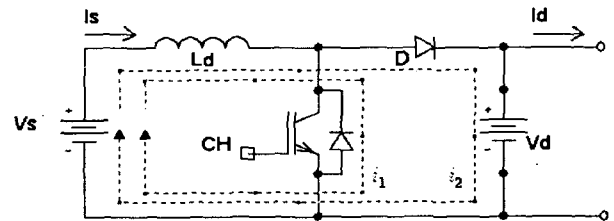
그림 3 태양전지의 일사량에 따른 출력특성

2.2 태양광 발전 시스템의 구성

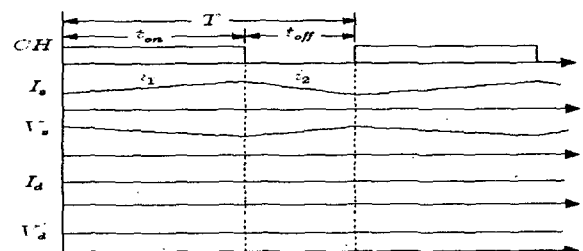
계통연계에 따르는 최적제어의 구성은 태양전의 발전 전력을 파워컨디셔너를 거쳐서 교류전력으로 변환하여 상용에 상시 접속하는 계통연계시스템과 발전부분과 파워컨디셔너의 중간에 축전지를 설치하여 독립전원으로 할 수 있는 독립전원시스템, 계통연계와 독립전원의 동작을 전환하는 계통연계 전환시스템으로 구성되어야 하며, 아울러 최대출력을 위한 MPPT제어와 전압의 안정적 변화와 고조파 억제에 위한 PWM제어가 고려되어야겠다.

2.2.1 승압 초퍼 회로

태양전지의 출력된 전압을 승압하기 위하여 승압 초퍼 회로를 구성하였고, 기본 동작은 CH가 ON일 때 $V_s - L_d - CH - V_s$ 의 경로로 전류 I_1 이 흘러 L_d 에 에너지를 축적하고, CH가 OFF 일때는 L_d 에 축적되었던 에너지와 태양전지의 출력이 직렬 연결되어 인버터 입력측에 전류 I_2 가 공급된다.



(a) 승압초퍼회로



(b) 동작파형

그림 4 승압초퍼회로와 동작파형

2.2.2 계통연계형 인버터 회로

계통연계형 인버터는 전원과 교류부하 사이의 전력을 균형있게 유지하기 위해 상용계통을 이용하는 데 부하가 필요로 하는 전력보다 인버터의 출력이 부족할 경우, 부족한 전력은 자동적으로 상용계통에서 공급되며, 부하가 필요로 하는 전력보다 인버터의 출력이 클 경우 그 잉여전력은 계통 선상의 다른 부하에 공급되기 위하여 계통선으로 공급된다.

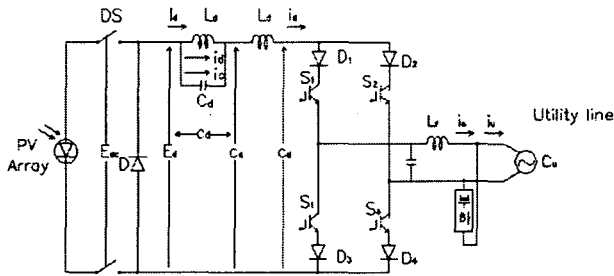


그림 5 계통연계형 인버터 회로

2.2.3 MPPT(Maximum Power Point Tracking)제어

한정된 면적의 태양전지로부터 최대의 전력을 발전하기 위해 사용하는 기술이 MPPT이다. MPPT 방법으로는 P&O법, IncCond법, 일정전압 제어법 등 3가지가 주로 사용된다.

P&O 법은 전압의 증감에 따른 전력의 변화를 측정하여 항상 최대 전력점에서 동작하게 제어하는 방법으로 전단계의 전압 전류와 현재의 전압 전류를 비교하여 다음 단계의 제어를 결정함으로써 최대 전력점에서 동작하게 한다. 이 방법은 광량이 낮은 경우 제어특성이 나빠지고, 광량 변화가 심한 경우 MPPT 추종을 실패하는 경우가 있다.

IncCond법은 임피던스 매칭법으로 부하의 임피던스와 태양전지의 임피던스가 같아지는 지점에서 태양전지 출력이 최대가 되는 것을 이용하는 방법이다. 최대전력점에서는 전압변동에 대하여 전력의 변화가 Zero가 되므로 식(6)과 같이 되고 발전전력 $P = I \times V$ 이므로 식(6)은 식(7)으로 나타난다.

따라서 식(8)가 만족하면 최대전력점이 된다.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{I}{dV} - \frac{V}{dI} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{V}{I} \quad (8)$$

즉 시간당 전압 전류의 비와 이때의 전압 전류의 기울기가 동일한 지점이 최대 출력점이 되는 것이다. 추종 성능이 우수하나 많은 연산을 필요로 하

여 프로세서에 상당한 부담을 주는 단점이 있다.

일정전압 제어법은 최대전력점이 일정 전압점에서 크게 벗어나지 않는 지점에서 나타나므로 전압을 일정하게 유지하여 제어하는 방법이다. 효율이 약간 떨어지고 정확한 MPPT 추정이 안되는 단점이 있으나 제어기 구성이 간단하여 소규모시스템에 적합하다.

그림 6은 최대출력추적제어를 위한 프로그램 흐름도를 나타낸다. 변조율이 $+\Delta MI_c$ 로 보정되고 있는 경우에는 과거전력과 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 함으로써 항상 태양전지의 최대출력 점에서 동작할 수 있도록 추적제어를 한다.

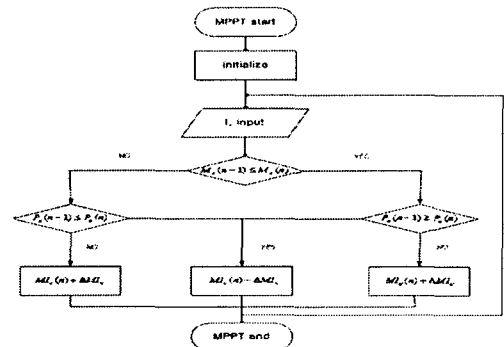


그림 6 최대출력추적제어 흐름도

2.2.4 PWM제어와 전압 및 위상 제어설계

전력 변환에서 안정된 출력과 최대 전압을 얻기 위해서는 승압 초퍼와 PWM 전압형 인버터로 구성하여야 하며, 안정된 변조를 위해서는 동기신호와 제어신호를 마이크로프로세서에 의해서 처리하여야 한다.

마이크로프로세서에 의한 PWM 신호 발생시에 변조 지연이 생기게 되는데 변조 지연의 원인은 최초의 인터럽트 주기에서 A/D 변환을 시작한 후 다음주기에서 그 변환된 데이터에 의해 제어를 위한 연산 및 펄스폭 연산을 하게 되며, 세 번째 주기에서의 연산된 데이터에 의해 PWM신호를 출력하게 된다. 따라서 실제로 프로세서가 샘플링 시점에서 인식한 데이터와 그 데이터를 출력하는 데에는 δ 만큼의 시간 지연이 생기게 되며, 이로 인하여 동기신호의 입력단측에 1차 RC 저역통과필터를 이용하여 A/D 변환되어 입력되는 계통 전압의 노이즈

성분을 제거하고, 위상 Shifter를 이용하여 PWM파형의 지연 시간을 보상할 수 있도록 한 변조지연 보상을 위한 벡터도로서 계통전압의 동기신호인 E_u 는 저역통과필터 및 위상 Shifter를 거쳐 변조지연각 δ 를 보상하여 전압의 크기는 같고, 위상은 δ 만큼 앞서는 기준 정현파 E_u' 를 만든다. 기준파 E_u' 와 90° 의 위상차를 갖는 기준 리액턴스전압 E_L' 를 입출력 전달함수로 나타내면 그림7와 같다.

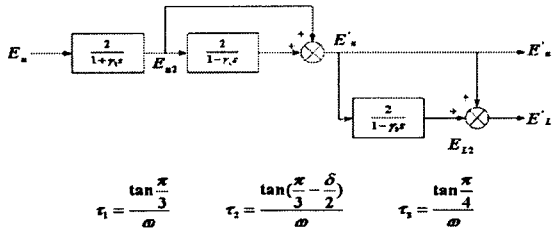


그림 7 변조지연 보상을 위한 흐름도

2.2.5 전체 시스템 구성

계통연계형 시스템은 직류전원과 교류부하 사이의 전력을 균형 있게 유지하기 위하여 상용계통을 이용하며 태양전지나 연료전지와 같은 대체 에너지원으로부터의 직류전력을 저장하기 위한 비싸고 비효율적인 축전지를 사용할 필요 없이 야간이나 우천에도 항상 부하에 전력을 공급할 수 있으며 또한 인버터 출력과 계통선 사이에 60(HZ) 절연 변압기를 설치하므로 직류 전원측 내부사고시 계통측으로의 직류분의 유출을 방지하도록 전기적인 절연을 행할 수 있으며 변압기 자체가 계통선으로 주입되는 고조파 전류를 허용치 이하로 줄이는데 기여하는 직류 임피던스 역할을 하므로 인버터와 계통선 전압의 인터페이스를 용이하게 해준다.

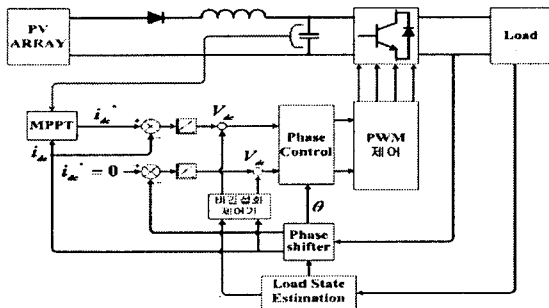


그림 8 전체 시스템 구성

2.3 시뮬레이션

태양전지로부터 출력된 직류전압을 승압시키기 위해서 승압초퍼를 사용하였으며 각 회로에 의해 동작되고 있는 상태를 실제 값보다 1/2감소하여 시뮬레이션을 하였다. 시스템에 사용된 회로정수를 표 1에 나타내었다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템과 단상 PWM

전압형 인버터로 구성하였다. 태양전지 모듈은 최대출력전력 43[W], 개방전압 18[V], 단락전류 3[A]이며, 12셀(cell)을 직,병렬 연결한 태양전지 어레이를 사용하였다. 계통전압과 출력전류를 고역률로 유지하기 위해서 PWM신호를 발생할 때 까지 생기는 지연시간 δ 를 계통전압을 A/D 변환하여 filter와 위상 Shifter를 사용하여 보상하고, 계통전압과 출력전류를 검출하여 위상차를 가감함으로써 고역률을 유지하도록 하였고, 병렬공진회로를 사용함으로써 직류 리액턴스의 크기를 감소시킬수 있어 스위칭 주파수는 4[KHz]로 구동하였다. 승압형 초퍼를 이용하고 MS7C196마이크로프로세서를 이용하여 자동보정하며 세팅된 전압보다 낮아지는 경우에는 전류센서에 의해 주회로 부분이 차단되도록 하였다. 각 회로의 시뮬레이션 파형을 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. 시뮬레이션결과 실제 동작될 수 있는 초퍼부분과 인버터 부분의 시뮬레이션결과가 양호한 상태로 나타났다.

표 1 회로정수

계통전압	220[V]	
직류 리액터	50[mH]	
병렬 공진	리액터	15[mH]
	콘덴서	560[μF]
필터	리액터	5[mH]
	콘덴서	2[μF]
변조비	0.85	
주파수	반송파	4[KHz]
	변조파	60[Hz]
태양전지	개방전압	110[V]
	단락전류	3[A]

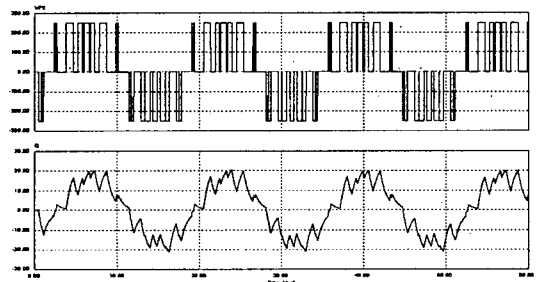


그림 9 인버터 출력파형 및 전류 시뮬레이션

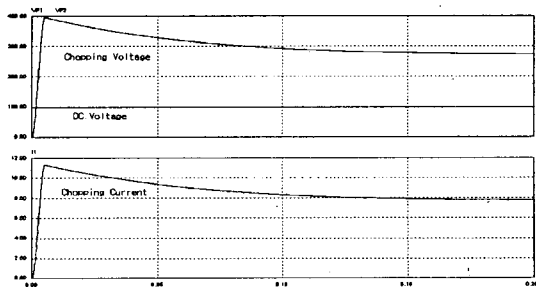


그림 10 승압초퍼의 전압 전류 시뮬레이션

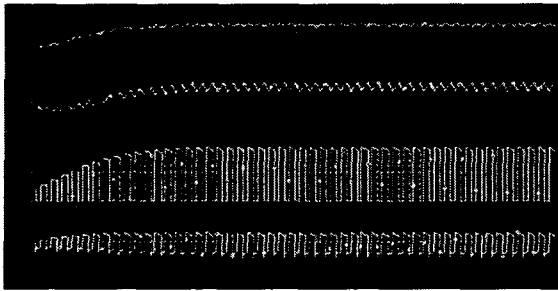


그림 11 초퍼 게이트신호 및 출력 전류파형 시뮬레이션

시정수를 5ms~10ms를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 그림 12~그림 13에 나타내었다.

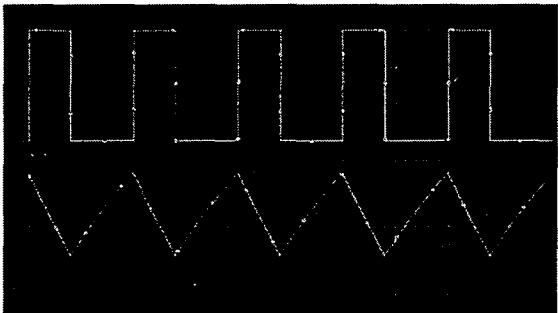


그림 12 초퍼 게이트 신호와 출력 전압 시뮬레이션

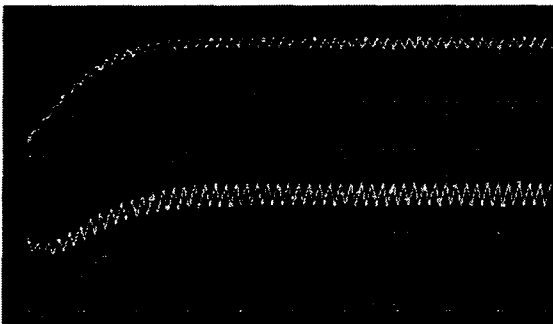


그림 13 초퍼 입력 전류와 출력전압 시뮬레이션

2.4 실험 결과

본 연구에서는 표 1의 회로정수를 이용하여 다음과 같은 실험결과를 얻었다.

또한, 본 연구에서 시스템 구성은 태양전지 array 12개를 직렬, 6개를 병렬로 구성 하였고 1개의 module은 최대 43[W], 개방전압 18[V], 단락전류 3[A] 정도를 사용하였다. 태양전지 array로부터 출력되는 직류 전압은 승압초퍼에서 승압 된 후에 단상 PWM 인버터에서 교류 전력으로 변환 되게 구성되었고 이와 같은 시스템을 구성하여 동작시킨 결과를 나타내었다.

R-L부하를 걸고 동작시킨 경우 직류전압 100[V]일 때 변환된 교류 전력의 출력 상태를 그림 14에 나타내었다.

단상 PWM인버터를 사용하여 최대한의 고조파를 줄일 수 있었고 양호한 정현파 파형이 나타나고 있음을 알 수 있다.

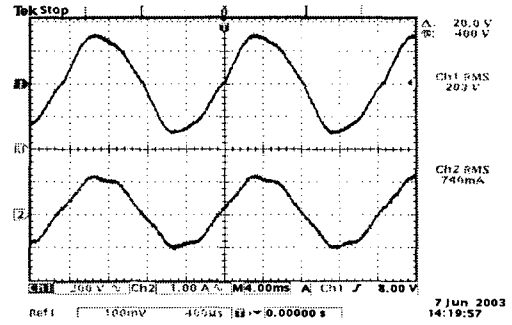


그림 14 인버터의 출력전압과 전류(R-L 부하시)

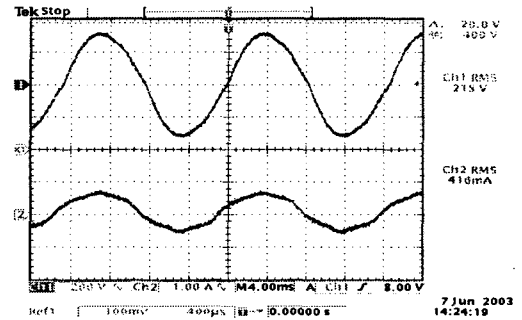


그림 15 인버터 출력 전압과 전류 파형(L 부하시)

그림 15는 위와 같은 조건에 의해 L 부하(53W 선풍기, 15W 선풍기, 10W 전동기)만을 사용한 경우, 출력 전압과 전류를 측정 한 결과를 나타내었다. 출력 전류에 비교적 낮은 고조파 함유를 가지고 양호한 파형을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그림 16은 같은 조건하에서 R-L 부하시 출력되고 있는 전압, 전류 그리고 출력전력 상태를 나타내고 있다.

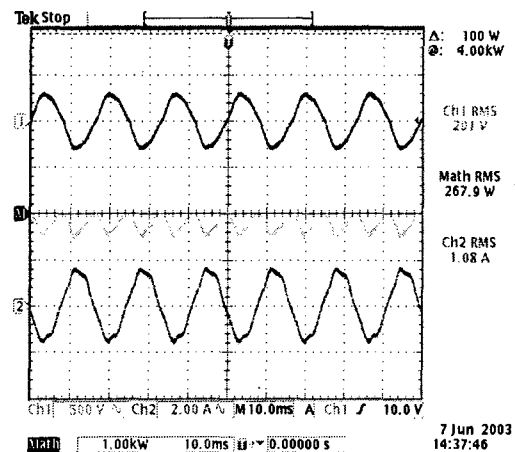


그림 16 인버터 출력 전압, 전류 및 전력 파형

3. 결 론

본 연구에서 직류전압원인 태양전지를 사용하고

낮은 직류전압을 승압초퍼를 사용하여 단상 PWM 전압형 인버터를 구성하여 운전한 경우에 제한한 마이크로프로세서를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 승압초퍼를 연계한 PWM 전압형 인버터의 동작으로 직류-교류 변환 발생전압에 의한 부하 적용을 하여 안정된 동작을 나타내었다. (15W, 53W 선풍기, 전등부하 180W 적용)
- (2) 태양전지의 실제전압과 전류를 측정하여 계산되어진 최적동작 전압을 직류전압 기준값으로 설정하여 승압되는 전압의 최대값이 태양전지가 항상 최대 출력점 근방에서 동작되도록 하였다.
- (3) 변조지연 보상기법을 이용하여 인버터 출력전압 고조파분을 제거함으로써 정현파에 가깝도록 제어할 수 있었다.
- (4) 초퍼와 인버터 사이에 병렬 공진회로를 이용함으로써 직류리액터의 크기를 감소시킬 수 있었다.
- (5) 계통연계 전압과 인버터 출력 전압, 전류를 동상으로 운전 시킬 수 있는 시스템으로 구성되어 있어 단위역률 운전이 가능하도록 하였다.
- (6) 마이크로프로세서에 의해 태양전지의 출력을 검출하여 샘플링된 과거전력과 현재전력을 비교하므로써 항상 최대출력점을 추적하는 제어 연산에 소요되는 시간을 줄이기 위해 고속연산 능력이 뛰어난 DSP의 사용이 요구된다.

태양전지에 최대출력 제어에 관한 보다 정밀한 제어기법과 최대출력이 항상 유지될 수 있는 MPPT 제어방식을 적용함으로써 소형 발전으로 가정용이나 소규모 전력을 필요로 한 장소에 사용할 수 있도록 설계하고 적용시키는 것이 향후 과제로 사료가 된다.

이 논문은 세명대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 堀米 孝, "太陽光發電の期待", 日本電氣學會誌, Vol. 112, No. 12, 1992.
- [2] 大野 隆彦, "太陽光發電技術の歩み", 日本電氣學會誌, Vol. 112, No. 12, 1992.
- [3] Sakutaro Nonaka, "A Suitable Single-phase PWM Current Source Inverter for Utility Interactive Photovoltaic Generation System", JIEE, Vol. 114, No. 6. pp. 631-637, 1994.

- [4] Sakutaro Nonaka, "A Novel Single-phase Sinusoidal PWM Voltage Source Inverter and its Application for Residential Photovoltaic Power Generation System", JIEE, Vol. 115, No. 2, pp. 115-118, 1995.
- [5] 根葉 保彦, 東 眞喜夫, 作太郎, "系統連系太陽光發電システムの最大出力点追従制御", 平成7年日本電氣學會全國大會講演論文集, No. 753, p. 124, 1995. 3.
- [6] 大西徳生, 古橋昌也, "太陽光發電システム用多機能PWMインバータ", 日本電氣學會論文集(D), Vol. 115, No. 8, pp. 969-977, 1995.
- [7] D. M. Bord and D. W. Novotny, "Current Control of VSI PWM Inverters", IEEE Trans. on ind. Appl., Vol. IA-21, NO. 4, pp. 769-775, 1984.
- [8] G. Franzo, M. Mazzucchelli, L. Puglisi, and G. Scitutto, "Analysis of PWM Techniques using Uniform Sampling in Variable-speed Electrical Drives with Large Speed Range", in conf. Record of IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 568-575, 1984.
- [9] 한전 기술연구원, "소규모 계통선 연결형 태양광발전 시스템개발", KRC-89G-J08, pp. 149-151, 1992. 8.
- [10] S. Nonaka, K. Kesamaru, K. Yamasaki, et al, "Interconnection System with Sinusoidal Output PWM Current Source Inverter between Photovoltaic Arrays and the Utility Line," IPEC-Tokyo, pp. 144-151, 1990.
- [11] S. Nonaka, K. Kesamaru, K. Yamasaki & M. Nishi, "Inter connection System with Single Phase IGBT PWM CSI between Photo-voltaic Arrays and The Utility Line", Conf. Rec. of IEEE/IAS Annual Meeting(Seattle Washington), p. 1302, 1990
- [12] R. Itoh, D. Eng, "Steady-state and transient characteristics for a single way step-down PWM GTO Voltage-source converter with sinusoidal supply current", IEE PROCEED DINGS, Vol. 136, Pt. B, No 4, pp. 168-174, July 1989.
- [13] J. T. Boys, A. W. Green. BE, "Current forced single phase reversible rectifier", IEE PROCEEDINGS, Vol. 136, Pt. B, No 5, pp. 205-211, September 1989.
- [14] P. Verdelho, G. D. Marques, "Digital Simulation and applications of the PWM Voltage Converter connected to the AC mains", EPE, FIRENZE, No 4, pp. 438-443, 1991
- [15] I. Nagy, "Control Algorithm of A Three Voltage Sourced Reversible Rectifier", EPE, FIRENZE, No 3, pp. 287-292, 1991.