

태양광 발전용 인버터 출력 전압의 위상 동기제어에 관한 연구

천 희영* 박 귀태* 안 호균* 엄 주경* 유 지윤** 송 진수***
* 고려대학교 전기공학과 ** 창원대학교 전기공학과
*** 한국 동력 자원 연구소

A Study on the Phase Synchronization Control of the Output Voltage
of the Photovoltaic Inverter

Hee-Young Cheon* Gwi-Tae Park* Ho-Gyun Ahn* Ju-Kyoung Eom*
Ji-Yoon Yoo** Jin-su Song***
* Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.
** Dept. of Electrical Eng., Changwon National Univ.
*** Korea Institute of Energy and Resources

ABSTRACT

The photovoltaic inverter is a system which transforms the solar energy to the electrical energy. Because the output of photovoltaic inverter depends on solar radiation, it is necessary to save generated power or to interface with utility line. This paper describes a 2KVA photovoltaic inverter utilizing IGBT, designed to have a very high efficiency in stand alone mode and to have the function synchronizing the phase between inverter and utility voltage as a fundamental study for utility interactive mode.

1. 서 론

최근 점차 악화되고 있는 에너지 사정과 관련하여 대체 에너지의 개발이 세계적으로 큰 관심의 초점이 되고 있다. 이 중 태양광 에너지는 환경 오염과 공해 문제가 없는 미래의 깨끗한 대체 에너지원으로서 선진국에서는 이미 실용화를 위한 개발이 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 현재까지 이에 대한 연구가 거의 이루어 지고 있지 않은 형편이다. 무한한 태양 에너지를 이용하는 태양광 발전은 현재 등대, 원격지 통신, 인공위성의 전원 공급원(독립형)으로 주로 사용되고 있으나, 앞으로는 개인 주택용 및 대규모 발전 시스템이 개발되어 태양광 발전의 실용화 시대를 맞이할 것으로 기대된다.

이와 같은 태양광 발전 시스템에서 발전되는 전력은 직류이기 때문에 상용 교류 전원을 필요로 하는 부하에 공급하기 위하여는 직류-교류 변환용 인버터가 필요하다.

Solar Array 에서 발전되는 직류전력은 하루중의 일사량이나 기후 조건에 따라 상당히 변동하며, 부하 전류도 사용하는 기기에 따라 심한 변화를 나타낸다. 또한 실용화와 관련하여 고효율을 유지하여야 하고, 무인 운전 및 자동화 제어가 이루어 져야 하기 때문에 범용 인버터와는 그 기능면에서 차이를 갖고 있다.

이러한 태양광 발전용 인버터는 전원과 부하사이의 전력을 균형있게 유지하여 부하가 필요로 하는 모든 전력 즉, 유효전력 및 무효전력 모두를 공급하도록

운전하는 독립형 인버터와 기존의 계통선과 연계하여 운전하는 계통선 연계형 인버터로 대별되며, 출력 제어 방식에 따라 전압 제어형, 전류 제어형 인버터로 구분된다.

따라서 본 연구에서는 상기와 같은 태양광 발전용 인버터에 대해 독립운전시와 연계시의 요구사항을 정립하고 이에 부합하는 제어 성능을 지닌 인버터의 회로를 설계, 시제작하고 그 부분적 특성을 검토하고자 한다. 구체적으로는 독립 운전과 연계 운전이 모두 가능한 전압 제어형 인버터를 구성하여 고효율화와 제어의 고성능화를 모색하고 일차적으로 단독운전 특성과 계통선 연계운전에 필수적인 위상 동기화 회로에 대한 검토 결과를 보고하고자 한다.

2. 태양광 발전용 인버터

2.1 독립형 인버터 (Stand Alone System)

독립형 인버터는 태양 전지와 축전지로 부터의 직류 전력을 교류 전력으로 변환하여 기존의 전력 계통으로부터 전력을 공급받지 못하는 낙도나 산간 벽지, 무인등대, 무인 중계소, 인공 위성등에 인버터 단독으로 부하에 전력을 공급하는 시스템이다. 인버터에 요구되는 기본 사양으로는 태양광 발전에 의한 직류 전력을 유효하게 교류전력으로 변환하여 인버터의 고효율화를 이루고 설비의 소형화 및 보수 유지가 용이해야 한다. 그림 1. 은 독립형 인버터의 블럭도로서 태양전지로 부터 발생하는 가변 직류 전압을 저장하는 축전지, 리플이 없는 안정된 직류용 인버터 양단에 공급하는 입력 필터, 직류 전원을 상용 주파수의 교류로 변환하기 위한 브리지 인버터, 인버터의 구형파 출력을서 고조파를 제거하고 양질의 정현파를 출력하는 정현화 필터 그리고 가변 입력 전압과 출력 전압 및 전류를 검출하여 인버터를 보호하는 보호회로등으로 구성되어 있다.

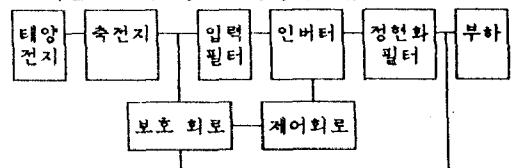


그림 1. 독립형 인버터의 기본 블럭도

2.2 연계형 인버터의 요구사항

계통선 연계형 인버터는 그림 2. 에서 처럼 부하에 전력을 공급하기 위해 계통선과 병렬운전을 하는 시스템으로서 직류 전원과 교류 부하 사이의 전력을 균형있게 유지하기 위해 계통선을 이용한다. 그림 2. 에서 연계형 인버터의 출력이 부하가 필요로 하는 교류 전력보다 클 경우, 그 잉여 전력은 계통선상의 다른 부하에 공급되기 위하여 계통선으로 공급되어 지며 반면 연계형 인버터의 출력이 부하에 전력을 공급하기에 부족할 경우, 부족한 전력은 자동적으로 계통선에서 공급되어 진다. 따라서 Solar Array로부터의 직류 전력을 저장하기 위한 비싸고 비효율적인 축전지를 사용할 필요가 없어지며 이것이 계통선 연계형 인버터가 지니는 장점중의 하나이다.

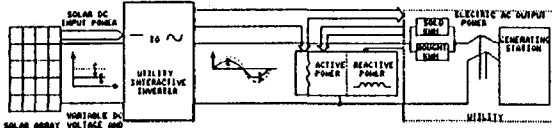


그림 2. 계통선 연계형 인버터의 전력 흐름도

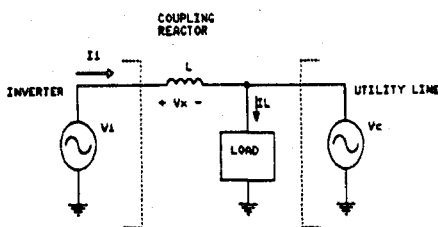


그림 3. 인버터와 계통선과의 연계 회로도

연계형 인버터는 출력 제어 방식에 따라 전압 제어형과 전류 제어형으로 분류되며 특히 전압 제어형 인버터는 계통선과 연계시 순시 전압차를 해결하기 위하여 그림 3.과 같이 연계 리액터를 삽입하며 이 연계 리액터에 공급되는 무효 전력과 부하에 공급되는 유효 전력을 제어하여야 한다. 또한 Solar Array와 계통선 사이에 전기절연을 행하여야 하는데 이를 실현하기 위해 본 연구에서는 출력단에 저주파 변압기를 추가함으로써 계통선과의 절연 및 인터페이스를 하였다.

이러한 계통선과의 연계운전을 위해서는 인버터는 다음과 같은 기능을 갖추어야 한다.

(1) 주파수 및 위상의 동기화 :

계통선 전압의 크기, 위상 및 주파수와 인버터 출력 전압의 크기, 위상 및 주파수를 동기시켜 연계운전사 두 계통간의 횡류(순환 전류)가 흐르는 것을 방지하여야 한다.

(2) 인버터 출력전압 제어 및 위상 제어 :

연계형 인버터가 부하와 계통선에 전력을 공급할때 역률1 제어를 위해서는 그림 4.와 같은 벡터도를 만족시켜야 하며 이를 위해 인버터 출력전압의 크기와 위상을 가변함으로써 무효전력과 유효전력을 제어

수 있는 출력전압 제어 및 위상제어 기능을 갖추어야 한다.

(3) 최대 전력 추종 제어(MPPT) :

연계형 인버터는 일사량에 따라 Solar array의 발생전력이 변동하여도 항상 최대 전력을 추종하도록 MPPT(Maximum Peak Power Tracking)기능을 갖추어야 한다. 태양전지의 발생 전력을 최대한 이용하여 고효율의 연계형 인버터로 운전하기 위해서는 그림 5.의 Solar array 특성 곡선상의 최대 동작점 Pmax에서 태양전지를 동작시켜 최대 전력을 이끌어 내야한다.

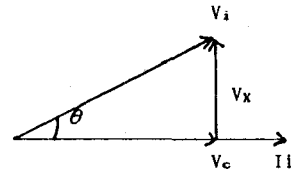


그림 4. 역률 1 제어를 위한 벡터도

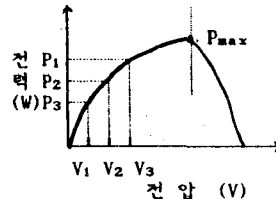


그림 5. 태양 전지의 부하 특성 곡선

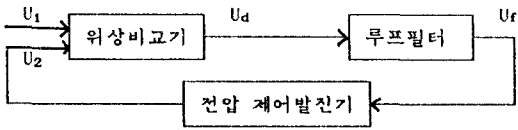
이중 본 연구에서는 DPLL(Digital Phase-Locked Loop) 회로를 사용하여 일차적으로 전압 크기와 위상의 검출 및 동기화 과정에 대한 설계 및 실험 결과를 제시하였다.

3. 계통선 연계형 인버터의 위상동기 제어이론 및 구성

3.1 PLL(Phase-Locked Loop)이론을 이용한 주파수 및 위상 동기화

계통선과 인버터를 연계운전 하기 위해서는 인버터와 계통선의 전압 크기, 주파수 및 위상이 일치하도록 제어하여야 하며 본 연구에서는 PLL기법을 적용하였다. 이 PLL회로는 2개 파형의 위상을 비교하여 그 위상차에 비례한 전압을 얻는 위상검출기(Phase Detector)와 위상 검출기의 출력 전압에서 고주파 성분과 잡음을 제거하여 평균 직류전압을 얻는 루프 필터(LPF) 그리고 이 평균직류 전압에 의해 발진주파수가 가변되는 전압제어 발진기(Voltage Controlled Oscillator; VCO)로 구성되는 일종의 서보회로로서 그림 6.의 출력선도여 보인바와 같이 피드백 루프 시스템이다.

폐루프 시스템의 동작에서 Phase-Lock 상태에 놓이게 되면 기준신호의 변화에 VCO 출력이 추종하게 된다. 그림 7.은 그림 6.의 PLL 블록도에서 각각의 출력파형이다.



U₁: 기준 신호(reference signal), U₂: VCO 출력 신호
 U_a: 위상비교기의 출력신호, U_r: 로우패 필터의 출력신호
 θ: U₁ 과 U₂의 위상차

그림 6. 기본 PLL의 블럭도

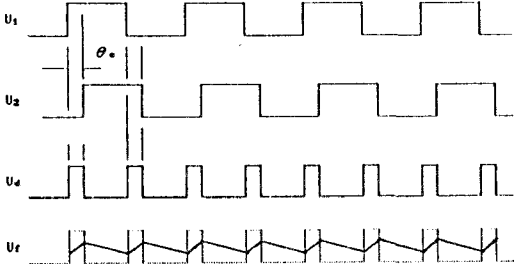


그림 7. PLL 블럭의 각부파형

3.2 위상 동기회로의 구성

본 연구에서 사용한 시스템의 전체 결선도는 그림 8.과 같다. PWM 제어회로는 ROM-based PWM 방식을 채택하였으며 그림 9.에 그 블럭도를 나타내었다. 또한, 위상 동기 제어 회로는 그림 10.과 같으며 동작원리는 다음과 같다.

인버터 출력과 계통선으로부터 feedback된 12V 교류는 디지털 PLL회로의 입력으로 사용하기 위하여, Zero crossing Detector 1,2에 의하여 구형파로 변환되어 위상 검출기(PD)에 입력된다. VCO(AD537)는 제어 입력전압이 0-12V까지 변화할때 출력 주파수가 0-24.907KHz로 가변되며, 인버터가 계통선과 동기한 정상적인 상태에서 위상검출기는 duty 50%, 진폭 12V의 구형파를 출력하여 루우패 필터(LF)에 의해 평균 직류전압 6V로 되며, 이것이 VCO의 제어 입력전압이 된다. 이때 VCO 출력은 12KHz로 발진하며 극부 발진기의 1.204MHz 출력과 D플립플롭에 의해 분주된 후 NAND Gate를 거쳐 61.44KHz의 클럭 펄스가 된다. 결국 61.44KHz의 클럭은 1024카운터에 의해서 계통선에 동기한 어드레스 신호가 되며, 이 신호가 ROM 테이블의 rectified 된 정현파 데이터를 D/A 컨버터를 통하여 내보내게 되며 PWM의 변조파 입력이 되어 인버터 출력이 계통선과 동기가 된다. 한편 인버터의 독립 운전시 VCO의 제어 입력 전압은 6V로 고정되고 VCO의 출력도 12KHz로 발진되므로 위와 같은 동작의 반복으로 정확한 60Hz의 독립 운전이 가능하다.

또한 그림 8.의 단상 브리지 인버터의 스위칭 소자로서는 18KHz의 고주파 스위칭 및 고효율화를 피하기 위해 전력용 트랜지스터와 MOSFET의 장점을 공유한 IGBT 모듈(FUJ, 75A, 600V)을 채택하였다.

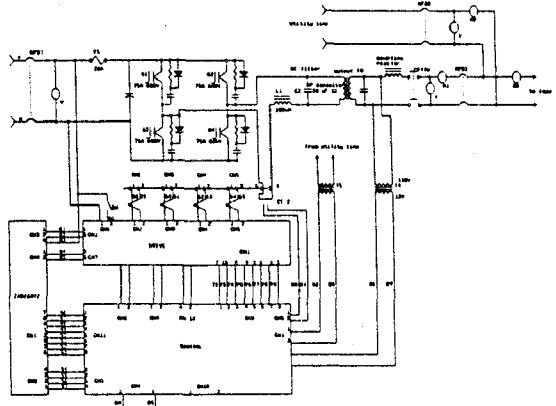


그림 8. 계통선 연계형 인버터의 전체 결선도

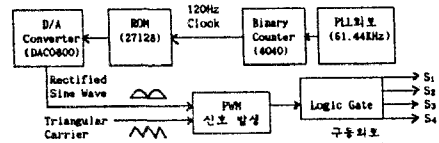


그림 9. PWM 제어부의 블럭도

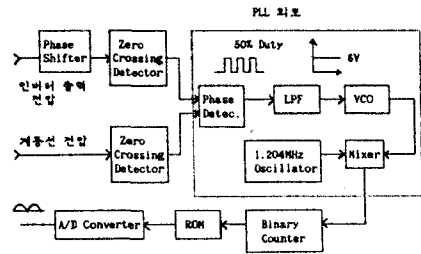


그림 10. 주파수 및 위상 동기 회로의 블럭도

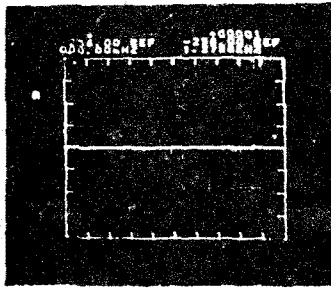
4. 시제직 인버터의 특성 평가 및 고찰

4.1 독립 운전

IGBT 브리지의 PWM 출력 파형과 그 스펙트럼을 그림 11. (a)-(b)에 나타내었다. 그림 11 (b)에서는 18KHz의 고주파 스위칭으로 인하여 저차 고조파는 모두 제거되고 제 21,23차 고조파만이 남아 있음을 알 수 있다. 그림 12(a)에는 인버터의 PWM 출력에서 정현화 필터를 통해 고조파를 제거시킨 60Hz, 110V 정현파 출력전압 파형과 그 스펙트럼을 나타내었다. PWM 출력 스펙트럼에서 나타난 제 21,23 차 고조파를 소용량의 정현화 필터에 의해 제거하여 60Hz 기본파 성분만의 왜형이 없는 정현파 출력을 얻을 수 있었다.

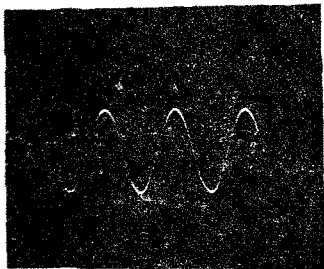


(a)

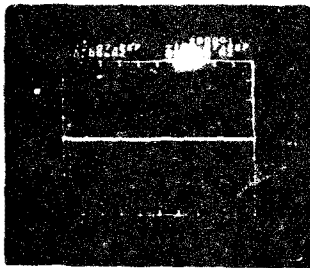


(b)

그림 11. (a) IGBT 인버터의 PWM 출력 파형
(50V/div, 5ms/div.)
(b) PWM 출력의 스펙트럼



(a)



(b)

그림 12. (a) 인버터의 정현파 출력 파형
(50V/div, 5ms/div.)
(b) 정현파 출력의 스펙트럼

태양광 발전용 인버터는 시스템 자체의 고효율화를 반드시 필요로 하기 때문에 인버터의 효율이 차지하는 비중이 크다. 그림 13.의 효율곡선에서 알 수 있듯이 무부하에서 정격부하 범위내에서 전체적으로 고효율 특성을 얻을 수 있었다. 이러한 시제작 인버터의 고효율화는 소자(IGBT)의 선정 과 이에 따른 구동 회로의 소비 전력 저감, 스위칭 주파수의 증대로 인한 정현파 필터의 소형화, 제어회로의 풀 디지털화에 의한 소비전력 감소등으로 이룰 수 있었다.

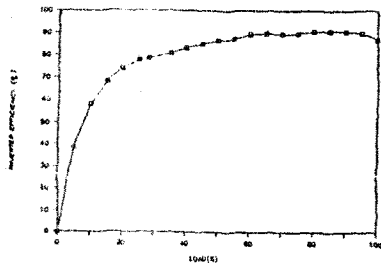
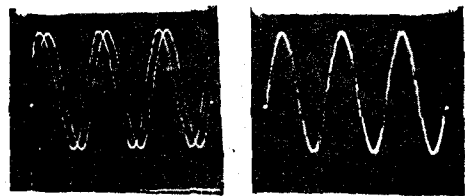


그림 13. 인버터 효율 곡선

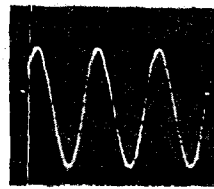
4.2 연계 운전

그림 14.는 인버터 출력과 계통선과의 위상 및 주파수 동기 과정을 보여 주고 있다: 연계 운전일 경우 계통선과 인버터 전압의 위상차가 3° 이내이고 양 계통의 전압크기 범위가 $110V \pm 10\%$ 이내 이며 출력 주파수가 $60Hz \pm 1\%$ 이내 일 경우 연계 스위치에 의하여 연계운전이 시작 된다. 3.2 절에서 설명한 DPLL 을 이용한 위상 동기 제어 회로에 의해 인버터 출력 전압과 계통선 전압이 정확히 동기화 되고 있음을 알 수 있다. 그림 15.는 인버터와 계통선 전압의 크기, 주파수 및 위상이 동기 제어회로에 의해 완전히 동기 되었을 때의 파형을 나타내고 있다. 또한 인버터 출력전압 파형(A)이 계통선 전압 파형(B) 보다 양질의 정현파임을 알 수 있다.

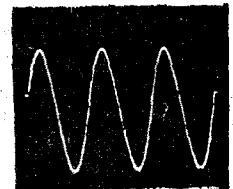


(a)

(b)



(c)



(d)

그림 14. 인버터 출력 전압과 계통선 전압과의 위상 동기과정(a)-(d)

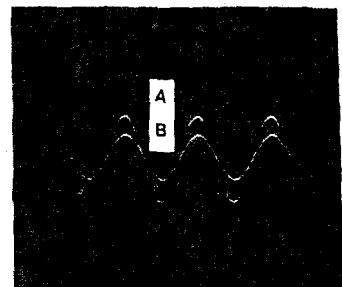


그림 15. 동기된 인버터 출력전압(A)과 계통선 전압(B) 파형

A : (50V/div, 5ms/div.)

B : (100V/div, 5ms/div.)

5. 결 론

본 연구에서는 태양광 발전 시스템의 효과적 운영을 도모하기 위해 독립 운전과 상용 전력 계통과의 연계운전이 모두 가능한 정격 출력 2KVA 의 태양광 발전용 인버터를 구성하여 특성을 평가, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인버터의 스위칭 소자로서 20-50KHz 의 고주파 스위칭이 가능하며 입력 임피던스가 높아 구동 회로의 소비전력을 줄일 수 있는 IGBT를 선정함에 따라 인버터 고효율화(90%이상)에 기여 하였다.
- 2) 인버터 출력파형의 고조파 함유량을 줄이기 위해 고주파 스위칭이 가능한 IGBT를 이용하여 18KHz 의 고주파 PWM 제어를 행한 결과 고조파를 거의 함유하지 않은 양질의 정현파 출력을 얻을 수 있었다.
- 3) 회로의 최적 설계를 모색한 결과 독립운전시 효율이 90% 이상의 높은 효율을 얻어 태양광 발전용 전력 변환 장치의 고효율화를 실현할 수 있었다.
- 4) 계통선과의 연계운전시 DPLL회로에 의하여 계통선과 주파수 및 위상을 정확히 동기시킬 수 있었다.

지금까지의 인버터 출력 전압과 계통선 전압과의 위상 동기화 제어는 인버터를 계통선과 연계 운전하기 위한 일차적인 연구로서 향후 2.2절에서 언급한 부하와 계통선에 전력 공급시 역률 1 제어를 위한 인버터 출력전압 제어 및 위상 제어와, 일사량에 따라 변하는 태양 전지로 부터 최대전력을 추종할 수 있는 최대 전력 추종 제어(MPPT) 를 추가 실현함으로써 계통선과의 완벽한 연계운전을 행할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] ALAN COCCONI, SLOBODAN CUK AND R.D.MIDDLEBROOK, "High-Frequency Isolated 4KW Photovoltaic inverter for Utility Interface", Proceedings of The Seventh International PCI'83 Conference, September 13-15, 1983.
- [2] Fumio Harashima, Hirochi Inaba, Nobukazu Takashima, Minoru Sasaki, "Microprocessor-Controlled SIT Inverter for Solar Energy System", IECON' 1985, pp.643-648
- [3] URS BOEGLI & REMO ULMI, "Realization of a New Inverter Circuit for Direct Photovoltaic Energy Feedback into the Public Grid", IEEE Trans.on Industry Application, VOL.IA-22, NO.2, MARCH/APRIL 1986.
- [4] G. L. Campen, "An Analysis of the Harmonics and Power Factor Effects at a Utility Intertied Photovoltaic System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 12 December 1982
- [5] B.K.Bose, P.M.Szczesny, and R.L.Steigerwald, "Microcomputer Control of A Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE/IAS Annual Meeting, vol.IA-21, pp.852-859, Sept./Oct.1984
- [6] Dr.Roland E. Best, "PHASE-LOCKED LOOPS Theory, Design, and Applications", McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- [7] P. DOBROVOLNY, J. WOODS, P. D. ZIOGAS, "A Phase-Locked-Loop Synchronization Scheme for Parallel Operation of Modular Power Supplies", PESC 1989, pp.861-869
- [8] GENERAL ELECTRIC, "POWER-MOS IGT : A New Gate Turn-Off MOS Controlled Power Semiconductor"