

공간벡터 PWM 방식을 이용한 태양광 발전 시스템 제어

조문택, 최혜길*, 이충식, 백종무

대원대학, 경희사이버대학교*

Photovoltaic Generation System Control Using Space Vector PWM Method

Moontaek Cho, Haegill Choi*, Chungsik Lee, Jongmu Baek

Daewon University College, Kyung Hee Cyber Univ.*

요약

본 논문에서는 태양광 발전시스템을 이용한 PWM(Pulse Width Modulation) 전압형 인버터를 전력변환기로 구성하였고, 안정된 변조를 위해서 동기신호와 제어신호를 56F8323 마이크로프로세서에 의해서 처리하였다. PWM 전압형 인버터는 태양전지가 연속 발전할 수 없는 단점을 보완하기 위해 일반 상용전원과 연계함으로써 약 10~20[%]의 전력 절감 효과를 얻을 수 있는 에너지 절약 전원 복합형 전력변환장치로 구성하였다. 그리고 PWM 전압형 인버터와 위상동기를 위해서 계통전압을 검출하고 계통전압과 인버터 출력을 동상 운전하므로 잉여전력을 계통과 연계할 수 있게 하였다. 또한, 고조파를 절감한 출력을 유지함으로써 부하와 계통에 전력이 안정하게 공급될 수 있도록 제어 시스템을 적용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, a photovoltaic system is designed with PWM(Pulse Width Modulation) voltage source inverter. Proposed synchronous signal and control signal was processed by 56F8323 microprocessor for stable modulation. The PWM voltage source inverter using 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 for ordinary use. It can cause the effect of saving electric power, from 10 to 20[%]. The PWM voltage source inverter operates in situation that its output voltage is in same phase with the utility voltage. In addition, I connected extra power to the system through operation the system voltage and inverter power in a synchronized way by extracting the system voltage so that the phase of the system and PWM voltage inverter can be synchronized. In the system of this research showed good results after being controlled in order to provide stable power to the load and the system through maintaining and low output power of harmonics.

I. 서론

최근의 태양전지를 비롯한 시스템의 저가격화 및 변환 효율의 개선이 진전됨에 따라 본격적인 전력 시스템으로 실용화 보급이 확대되는 추세에 있다.^[1]

태양전지의 특성은 일사량, 온도 등에 크게 영향을 받기 때문에 가능한 한 많은 에너지를 얻기 위해서는 태양전지의 출력을 항상 최대로 제어할 필요가 있다. 또한 태양전지의 출력은 직류이므로 계통과 연계하기 위해서는 인버터를 사용해서 교류로 변환할 필요가 있으며, 단위역률을 갖는 정현파 전류 및 전압을 공급해 주어야 한다.

태양광 발전 시스템은 상용전력 계통과의 접속 방법에 따라 두 가지 시스템으로 분류된다. 양자가 전기적으로 항상 접속되어 있는 시스템을 병렬 연계 시스템이라 하고, 전기적으로 항상 분리되어 있다가 발전 전력이 부족할 경우에만 접속되는 시스템을 계통절환 시스템이라 한다. 전자는 태양광 발전 잉여전력을 계통에 역송전이 가능한 시스템이고, 후자는 역송전이 불가능하며 단순히 부하에만 전력을 공급할 수 있는 시스템이다.^{[2],[3]}

본 논문에서는 1.0[kW]의 PWM(Pulse Width Modulation)인버터 3상 계통연계형 태양광 발전시스템의 설계 방법의 제시하였다. 이외에도 정현파 변조 방법과 공간벡터 변조방법의 비교를 통한 3상인버터의 제어기법으로 벡터제어를 기술하였으며 실증 제작된 시스템을 통하여 운전시험을 한 결과 본 연구의 우수성을 입증할 수 있었다.

II. 계통연계형 태양광 발전 시스템의 구성

1. PWM 전력변환기의 구조

전압형 컨버터는 교류측에 설치되어 있는 리액턴스의 크기와 리액턴스 양측전압에 의하여 변환되는 전력량이 결정된다. 또 리액턴스의 양단전압에 따라 전압형 컨버터의 동작이 달라진다.

전압형의 전력변환기는 전압과 주파수 및 위상을 모두 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. 게다가 전

력변환기를 제어하는 고속, 고기능의 마이크로프로세서 등이 개발되고 이들의 응용을 통해 전압형의 전력 변환기가 산업분야에 광범위하게 적용되고 있다.

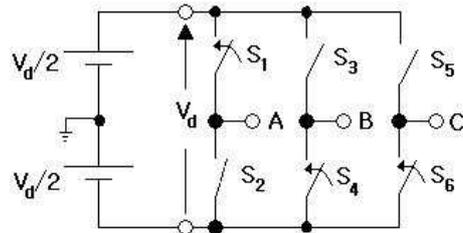


그림 1. 3상의 전력변환회로

그림 1의 회로에서 A, B, C 단자에 출력되는 전압은 상전압이 되고 각 단자간의 전압은 선간전압이 된다. 선간전압은 각 상전압의 차 전압을 의미하며 선간 전압이 정현파가 되려면 각 상의 단자전압이 정현파로 되어야 하는데 이러한 상전압의 파형을 만드는 방법은 그림 2에서 설명한다.

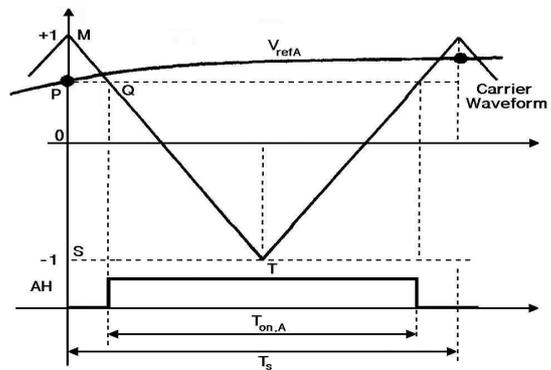


그림 2. 1상의 PWM 변조

그림 1에서 A상의 회로의 S₁에 해당하는 도통 구간을 AH로 하여 그림 2에 표시하였다. 그림2에서 V_{refA}는 변조파이고 삼각파형은 캐리어 파형을 나타낸 것으로서 변조파와 캐리어 파형을 1개의 그림으로 표현한 것이다. PWM 변조는 변조파와 캐리어 파형의 상호 크기에 따라 출력 파형 AH가 변하게 되며 식 (1)과 같이 성립된다.

$$\frac{|PQ|}{|ST|} = \frac{|PM|}{|SM|} \quad (1)$$

삼각형 MST와 삼각형 MPQ의 관계에 의해 식 (2)로 나타낼 수 있다

$$\frac{1 - V_{refA}}{2} = \frac{T_S - T_{on}}{T_S} \quad (2)$$

식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{T_{on}}{T_S} = \frac{1 + V_{refA}}{2} \quad (3)$$

스위칭 주기에서 출력의 평균전압에 식 (3)을 대입하면 A상의 전압은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{outA} = \frac{V_d}{2} V_{refA} \quad (4)$$

PWM 변조에서 출력전압은 V_{refA} 에 대하여 비례하는 전압이 된다. 정현파를 출력하려면 V_{refA} 가 정현파가 되므로 식 (5)와 같이 된다.

$$V_{refA} = r \sin(\theta) \quad (5)$$

식 (5)와 같이 하면 정현파 변조가 되며, 식 (5)에서 비례상수 r 는 변조율이라고 한다. 변조의 1주기에서 S_1 의 통전은 식 (3)에 의하여 식 (6)과 같이 된다.

$$T_{on} = T_S \left\{ \frac{1}{2} + r \sin(\theta) \right\} \quad (6)$$

2. 계통연계형 전력변환기 제어

P-I제어기에 의하여 리액터 양단의 전압을 제어하여 목적한 크기의 전류가 흐르도록 할 수 있다. 입력단 리액턴스 X 에 걸리는 전압 V_L 은 식 (7)이 된다.

$$V_L = V - E = XI^* + \left(\frac{ki}{s} + kp \right) (I^* - I) \quad (7)$$

전력변환기의 교류측 전압은 직류전압과 PWM 변조에 의하여 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 식 (7)에서 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$E = (V - XI^*) - \left(\frac{ki}{s} + kp \right) (I^* - I) \quad (8)$$

식(8)에서 우변 1항은 전원전압에서 리액턴스 강하를 뺀 전압이므로 정상상태에서 전력변환기의 전압벡터를 의미한다. 우변 제2항은 PI제어기의 동작으로 설정한 전류가 되도록 리액턴스의 전압을 제어한다.

$$\begin{bmatrix} e_{vd} \\ e_{vq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X i_q^* \\ V_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)에서 우변 제2항에 의한 전류제어로 불평형 보상이 이루어진다. 그림 3과 같이 비례제어는 정직좌표계에서 연산하고 적분제어는 정상분과 역상분을 분리하여 각각 반대 방향으로 회전하는 두 개의 회전좌표계에서 연산을 한다.

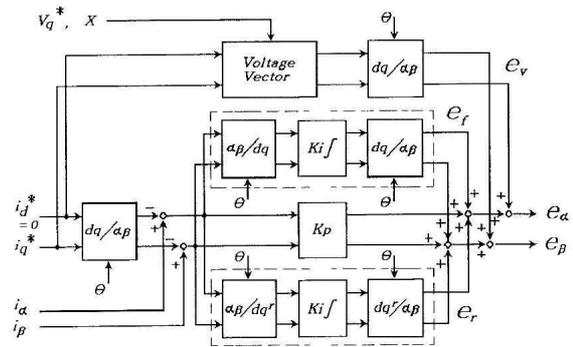


그림 3. 전류제어

그림 3은 식 (8)에 의한 전류제어로 구성된 제어 블록도이다. 그림 3의 블록도에서 e_v 는 전류오차 $(I^* - I)$ 를 입력으로 한 역상회전 좌표계에 대한 PI제어기의 출력이다.

e_α, e_β 는 정상상태의 벡터를 포함하고 정상분과 역상분을 보상하는 최종 출력이며 전력변환기를 구동하는 신호가 된다.

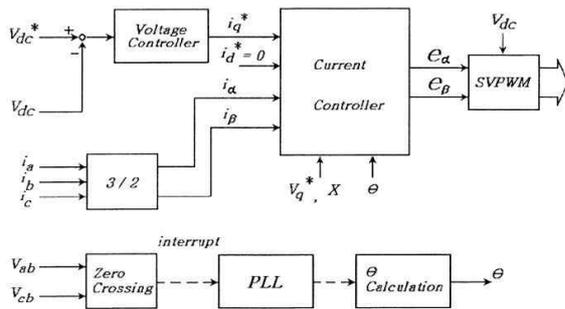


그림 4. 컨버터의 제어

그림 4와 그림 5는 그림 3의 제어블록을 포함하고 전압제어와 전류검출 및 위상 검출방법을 나타낸 블록도 및 전력변환기의 시스템을 나타낸 것이다. 전원의 위상 검출은 PLL 방법을 사용하여 위상각과 상회전의 방향을 프로그램에 의하여 계산되도록 하였다.

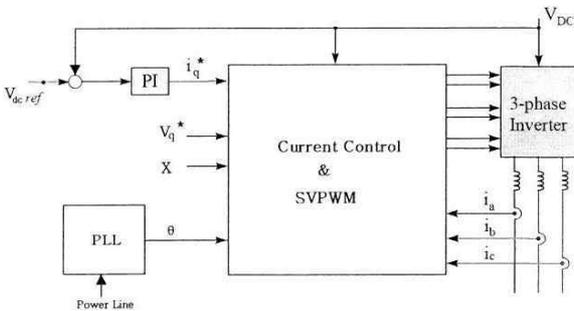


그림 5. 계통연계형 전력변환기

3. 변조방식과 출력전압

정현파 변조의 경우에는 최대전압을 출력할 때 기준점에 대한 각 상의 단자전압은 펄스 파형의 평균 전압이 식(10)과 같이 된다.

$$\begin{cases} v_A = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\theta) \\ v_B = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ v_C = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)을 α 축과 β 축 성분의 형태로 표현하면 정현파와 변조방법에 대한 최대전압을 출력할 때의 전압벡터는 식 (11)이 된다.

$$V_{rs} \rightarrow = \frac{V_{dc}}{2} e^{j\theta} \quad (11)$$

식 (11)로 나타나는 회전벡터는 상전압의 최대값과 크기가 같으므로 선간전압의 실효값은 식 (12)와 같다.

$$V_{ls} = \frac{V_{dc}}{2} \sqrt{3} \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.612 V_{dc} \quad (12)$$

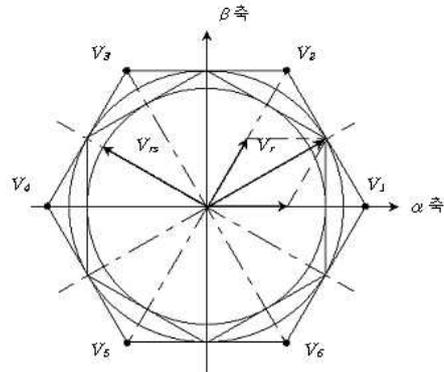


그림 6. 정현파 변조와 공간벡터변조의 출력비교

공간벡터 변조방법에 있어서는 각 구간에 대한 양측의 두 벡터의 합이 전압벡터로 되며, 그림 6에서와 같이 최대전압은 큰 원을 이루는 회전벡터가 된다. 이때의 선간전압은 식 (13)과 같아 나타낼 수 있다.

$$V_l = \frac{2 V_{dc}}{3} \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{3} \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 V_{dc} \quad (13)$$

식 (13)은 직류전압에 대하여 정현파 변조의 경우보다 높은 전압을 출력할 수 있는 특징을 갖는다.

정현파 변조에서는 직류전압의 61.2[%], 공간벡터 변조에서는 70.7[%]의 교류전압을 얻을 수 있으므로, 공간벡터 변조방법이 정현파 변조방법 보다 더 넓은

범위에서 전력변환이 이루어지고 전력반도체소자를 효과적으로 사용하는 방법이 되며 기기의 제어 등 응용분야에 대한 제어범위가 확대된다.

III. 실험 결과

제안된 PWM 인버터 계통 연계형 태양광발전 시스템은 42[W] 태양전지모듈 12개를 직렬2식과 병렬연결로 DC 216[V]를 인버터의 입력전압으로 사용하였다. 표 1은 1.0[kW]급 태양광 발전시스템의 설계규격을 나타낸다. 그림 7(a)는 PWM 인버터 장치의 외부 구조이고, 그림 7(b)는 PWM 인버터장치의 내부 구조로 3상 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), PWM 인버터, DSP 56F8323를 사용하였으며 DC 220[V]~400[V], 3상 인덕터 및 캐패시터는 각각 2[mH], 60[mF]으로 하였다.

표 1. 1.0[kW] 태양광 발전시스템 설계규격

항 목	규 격
태양전지모듈	42[W] (4inch 단결정, Vmax : 18[V])
	24[EA] , 12개 직렬 2식, 병렬로 연결
인버터	입력전압 DC 216[V]



(a) PWM 인버터 외부 (b) PWM 인버터 내부

그림 7. PWM 인버터 장치

IGBT를 턴온/턴오프를 위하여 PWM 컨트롤러의 IGBT 게이트 펄스 파형은 그림 8과 그림 9과 같이 구형파로 나타났으며, 약 180° 위상차와 8[kHz] 부근에서 교번 스위칭 된다. IGBT에서 교번 8[kHz] 부근에서 스위칭하여 변압기의 1차측의 파형은 그림 10과 같이 8[kHz]의 유사구형파와 특성을 가지고 있다. 변압기의

2차측 출력파형은 8[kHz]의 고주파수로 스위칭 하기 때문에 기본파에 높은 고조파들이 많이 포함되어 있으므로 이 고주파 성분을 감소시켜 PWM인버터의 출력전압을 고조파 노이즈 성분을 제거한 구형파로 하기 위하여 인버터 출력단에 LC필터를 설치하여 그림 11와 같이 고조파가 제거된 출력전압 파형을 얻었다. IGBT의 동기정류를 위한 동기신호파형은 그림 12이며, 인버터의 출력상용전원인 AC 220[V], 60[Hz]일 때의 파형은 그림 13에 나타냈다.

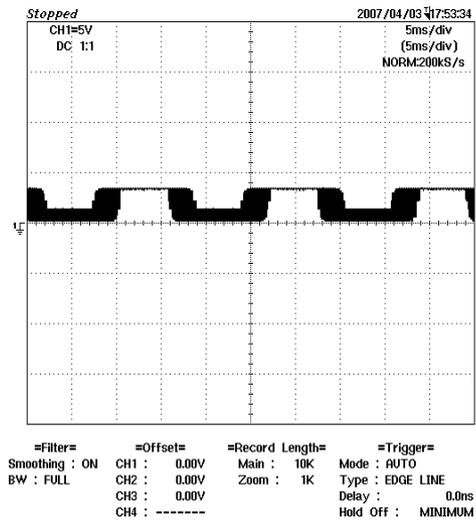


그림 8 A상 PWM 파형

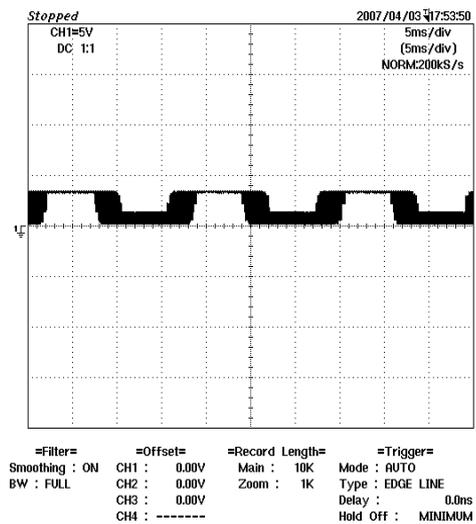


그림 9 B상 PWM 파형

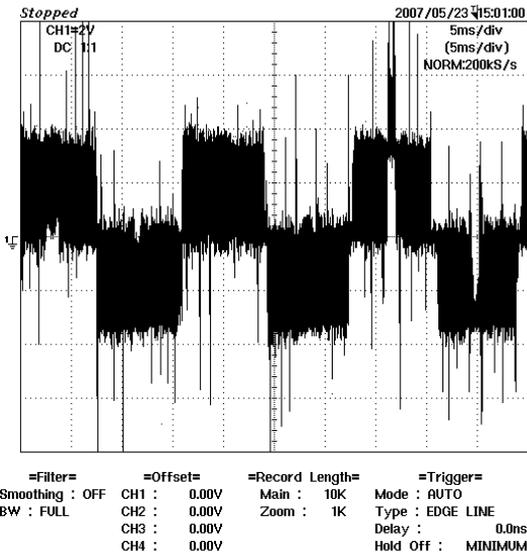


그림 10. 출력 전압 파형(필터미사용)

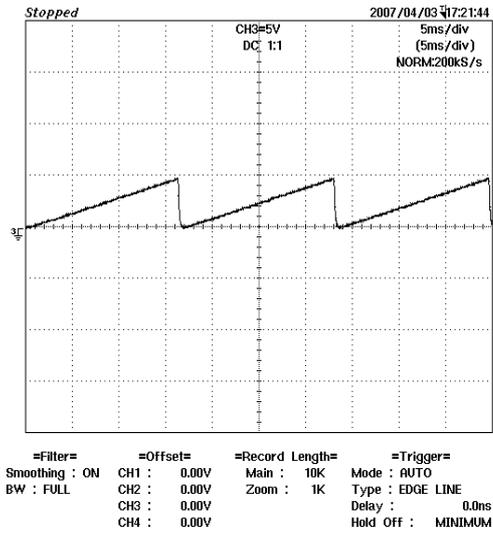


그림 12. 동기신호 파형

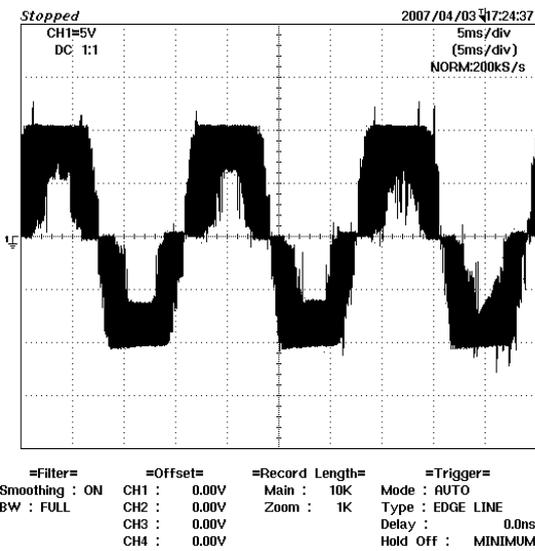


그림 11. 출력 전압 파형(필터사용)

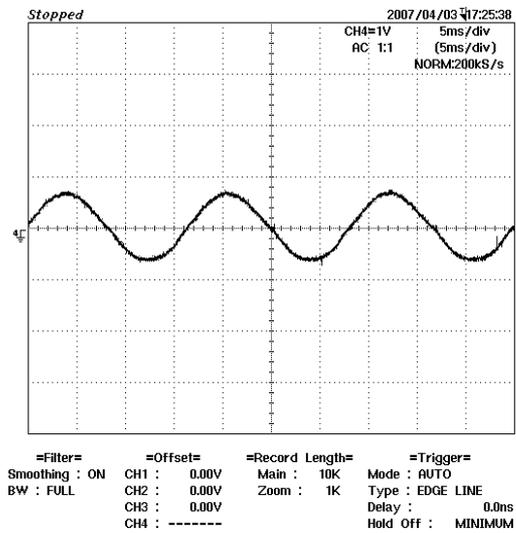


그림 13. 출력전류 파형

IV. 결론

본 연구에서는 PWM 인버터를 이용한 계통 연계형 태양광 발전시스템을 구성하였으며, PWM방식의 인버터로 구성된 전력변환기를 이용하여 실험을 수행한 결과 태양광 발전 시스템의 안정성을 위해 계통전압의 위상각을 검출하여 PLL 회로로 시스템을 구성하여

기준되는 위상을 검출하여 동기화 시켜 정확한 전류 제어를 수행하여 단위역률로 연계운전이 가능하였으며, 공간벡터 변조방법이 정현파 변조방법 보다 더 넓은 범위에서 전력변환이 이루어짐을 알 수 있었다.

또한 인버터 출력단에 LC필터를 설치하여 PWM 인버터의 출력전압의 고주파 성분이 감소된 출력 전압 파형을 얻을 수 있었다.

앞으로의 과제는 태양광 발전시스템의 전력변환과정에서 효율을 높일 수 있는 새로운 변조기법이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Yulei Gong, Tingting Lv, Yubing Duan, Hui Wang, Qingmin Li, "Controllable power output research for single phase photovoltaic inverter", Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference , pp.1-4, 2009
- [2] S. J. Ching, K. T. Chang, C. Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy System", IEEE Trans. Electronics, Vol.45, No.3, PP.385 ~394, 1998
- [3] Jiyong Li, Honghua Wang, "Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method ", Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on ,pp.1-6, 2009
- [4] H. Kobayashi, K. Takigawa, " A New Protective Method for Grid Connected Dispersed PV systems to Detect Short Circuit Fault in Distribution Line", PVSEC-9 Technical digest, pp.59~60, 1996
- [5] JF.Moymhan, Rc, Kavangh, M. GEgan, and JM.D Murphy "Indirect Phase Current Detection for Field Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive" EPE91 Cont. Rec..NO3, PP.261~266, 1991