

# 태양광 발전을 이용한 유도전동기 드라이브의 벡터제어

(Vector Control of Induction Motor Drive Using Photovoltaic Generation)

정병진\* · 고재섭 · 최정식 · 김도연 · 정동화

(Byung-Jin Jung\* · Jae-Sub · Ko · Jung-Sik Choi · Do-Yeon Kim · Dong-Hwa Jung)

## Abstract

This paper is proposed the vector control of 3-phase induction motor drive system by photovoltaic generation. For performance of vector control using a current control voltage source inverter(CC-VSI). CC-VSI is controlled by torque and flux producing component of motor current, relating with current and voltage value of photovoltaic arrays at maximum power point that varies follow different level of insolation. The MPPT using a DC-DC converter controlled the duty cycle to track maximum power from PV under different insolation conditions. The simulation results are shown that the characteristics and performance of drive system, which varies as each conditions of light by expresses in voltage( $V_{dq}$ ), current( $I_{dq}$ ), speed of motor and torque.

## 1. 서론

태양광 발전시스템은 어떤 환경오염도 유발하지 않으면서 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환 할 수 있기 때문에 대체에너지로 주목받고 있다. 최근의 반도체 기술 및 제조공정의 발달로 태양광 발전시스템은 기존의 화석연료 및 기타의 발전시스템과 충분히 경쟁을 이룰 수 있다는 것으로 보고되었다.[1]-[3] 태양광 발전시스템은 각 모듈의 출력 특성이 일사량, 온도 및 부하변동 등에 의해 그 동작점이 변화하게 된다. 따라서 이러한 요소로 인한 변동에 대하여 태양전지는 항상 최대출력을 낼 수 있는 최대 출력점 추정(Maximum Power Point Tracking) 제어기법을 적용해야 한다.[4] MPPT 알고리즘은 일사량과 표면 온도의 변화에 따라 가변하는 태양전지의 최대 출력점을 추종하여 전압 지령치로 출력하는 동작을 한다. MPPT는 동일 일사량에서 발생하는 전력이 발전전압에 따라 변한다. MPPT 제어를 하지 않을 경우 태양전지는 최대 전력점에서 발전할 수 없게 되어 태양전지의 발전효율이 저하된다. 따라서 기상조건과 부하조건에 따라 동작전압을 최적으로 하는 MPPT 제어가 필요하다. 종래에는 MPPT 제어에 있어서 일사량 변동 등의 환경변화에 대하여 제어를 수행하였다.[4-5] 이러한 태양광 발전의 MPPT 동작 수행은 DC-DC 컨버터의 듀티 비를 조절함으로써 이룰 수 있다.

산업용 전동기의 가변속 분야에서 정밀한 속도제어, 위치제어 및 급 가·감속 운전 등을 필요로 한다. 이러한

용도에 사용되는 구동 시스템에는 계자전류와 전기자 전류를 독립적으로 제어가 가능해야 하며 토크제어가 용이한 직류전동기가 주로 사용되어 왔다. 그러나 직류전동기는 정류자와 브러시의 마모에 따른 보수점점이 필요하며, 정류자의 정류 한계상 고속화, 고압화 및 대용량화에도 한계가 있으며 설치 장소에도 제약을 받는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 구조가 간단하고 견고한 교류전동기의 가변속 시스템의 실용화가 진행되어 왔다. 따라서 구조가 간단하고 유지 보수면에서 유리한 유도전동기의 응용분야가 점점 확대되고 있으며, 특히 제어가 용이할 수 있도록 벡터 제어 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서 태양광 발전의 MPP에서 PV 어레이의 전압 값과 전류 값에 관련된 고정자 전류성분을 만드는 자속과 토크의 양호한 동적 응답을 갖는 PV 어레이로부터 공급되는 유도전동기 드라이브 시스템의 벡터제어를 제시한다. 유도전동기의 속도는 일사량 변화에 따라 다양하게 변하고 있는 벡터제어 시스템에서 효과적으로 나타난다.

## 2. 시스템 모델링

본 논문은 태양광 발전을 이용한 유도전동기의 벡터제어에 관한 것으로 그림 1은 본 논문에서 제시한 전체 시스템을 나타낸 것이다.

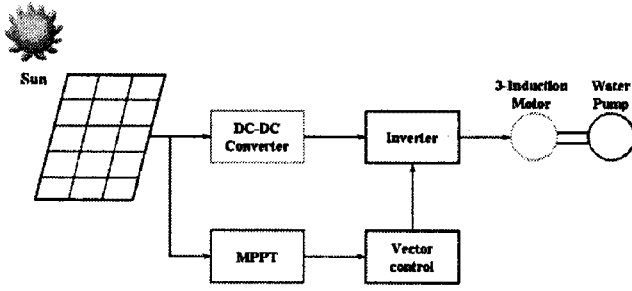


그림 1. 제시한 시스템  
Fig. 1. Proposed System.

### 2.1 PV 모델링

그림 2는 태양전지의 등가회로를 보여주며 단락전류  $I_{sc}$ 는 이상적으로 광전류  $I_c$ 과 일치하고, 다이오드 포화 전류  $I_o$ 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다[6].

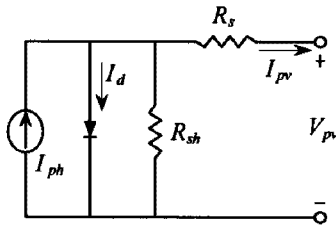


그림 2. 태양전지 등가회로.  
Fig. 3. Equivalent circuit of PV array.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_{pv}}{I_o} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서,  $V_{oc}$ 는 개방전압,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $q$ 는 전하,  $I_o$ 는 포화전류,  $T$ 는 태양전지 동작온도[K]를 나타낸다. 또한, 온도의 변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음 식과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[ e^{\left( \frac{qV_{oc}}{kT} \right)} \right] \quad (2)$$

태양전지 모듈은 원하는 전압과 전류를 얻기 위하여 다수의 태양전지 셀을 직·병렬로 연결하여 구성하고, 또한 태양전지 어레이는 이러한 모듈을 다시 직·병렬로 연결하여 제작한다. 태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_{ph} = I_{sc} S_N + I_i (T_c - T_r) \quad (3)$$

$$I_d = I_o \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{kT} \right)} - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = I_{or} \left[ \frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\frac{qE_g}{Bk} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (5)$$

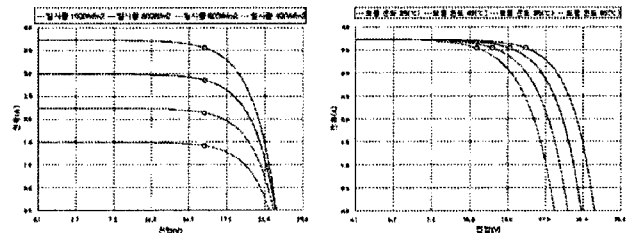
$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

여기서,  $I_{ph}$ 는 광전류,  $S_N$ 은 단위 일사량,  $I_i$ 는 단락

전류 온도계수[ $A/K$ ],  $I_d$ 는 다이오드 전류,  $R_s$ 는 직렬저항,  $R_{sh}$ 는 병렬저항,  $T_c$ 는 태양전지 온도[K],  $T_r$ 는 태양전지 기준온도[K],  $A, B$ 는 제조상수,  $I_{or}$ 은 역포화 전류,  $E_g$ 는 에너지 밴드갭을 의미한다.

### 2.2 태양전지의 최대전력점

태양 전지 셀의 특성은 V-I 특성곡선의 동작에 따라 이해할 수 있다. 이러한 특성 곡선은 태양전지 셀의 현재 동작에 따라 생성된다. 그림 3의 (a)는 다양한 일사량에 대한 V-I 관계를 나타내고 (b)는 온도변화에 따른 V-I 특성곡선을 나타낸다. 그림 3에서와 같이 특정 일사량과 온도에서 V-I 곡선의 하강 지점에 특징적인 점 즉, 최대전력점이 나타난다. 최대전력점 추적 알고리즘은 이러한 점들을 추적하여 얻어지므로 전체 시스템의 최적 동작점을 얻을 수 있다.



(a) 일사량 변화 (b) 온도 변화  
그림 3. 태양전지의 V-I 특성곡선.  
Fig. 3. V-I characteristic curve of solar cell.

### 3. 제어 시스템 설계

유도전동기의 동적 모델은 PV어레이의 전압과 전류에 관련된 3상 전압 방정식을 기반으로 한다. 최대전력의 전류와 전압은 제어 시스템에서 제어되며, PV의 출력은 식 (7)과 같다.

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv} \quad (7)$$

이러한 출력은 속도와 토크의 식으로 관련될 수 있는 유도전동기 펌프에 공급되며 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = K\omega^2 \quad (8)$$

여기서  $K$ 는 상수이다.

유도전동기에 의한 펌프의 기계적인 출력은 식 (9)과 같이 나타낸다.

$$P_{out} = K\omega^3 \quad (9)$$

제어 시스템에 대한 손실을 무시하면 식 (9)은

식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\omega = \left( \frac{V_{pv} * I_{pv}}{K} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

유도전동기 펌프에서 기계적 토크를 얻기 위해 식 (10)에 식 (8)을 대입하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$T = K * \left( \frac{V_{pv} * I_{pv}}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

유도전동기 드라이브의 벡터 제어는 고효율 드라이브 시스템을 위한 고정자 전류의 토크와 자속으로 직접적으로 제어되고, 이는 일사량 변화에 따라 변화된다. 자속이 일정하고  $i_{ds}^e$  가 식(12)과 같이 개방회로 전동기 테스트를 통한  $i_m$ 와 같다고 가정한다.

$$i_m^* = \frac{1}{(L_s + L_m)} * \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{V}{\omega} \quad (12)$$

전기적 토크와 제어 전류는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds}^e I_{qs}^e \quad (13)$$

토크 성분의 전류  $i_{qs}^e$ 는 식(11)~(13)을 정리하여 얻을 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{qs}^e = \frac{K * \left( \frac{V_{pv} * I_{pv}}{K} \right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} * \frac{P}{2} * \frac{L_m}{L_r} * \left( \frac{L_m}{L_s + L_m} \right) * \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{V}{\omega}} \quad (14)$$

또한, 드라이브 시스템의 효율에 관련된 슬립 주파수는 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_2 = \frac{R_r}{L_r} * \frac{I_{qs}^e}{I_{ds}^e} \quad (15)$$

식 (14)은 태양광 어레이의 전압과 전류가 변화할 때 토크 전류  $i_{qs}^e$ 를 나타내고 있으며 자속성분 전류  $i_{ds}^e$ 와 슬립 주파수도 변화된다. 그러므로 전동기 속도는 이런 조건에 따라 변한다. 전기적 각은 벡터변환에서 슬립주파수 값의 관계로 결정될 수 있고, 식 (16)과 같다.

$$\theta_e = \int (\omega_2 + \omega_r) \cdot dt \quad (16)$$

제어 전류  $i_{qs}^e$  와  $i_{ds}^e$ 는 동기 회전축에서 나타난다. 이것은 DC 양과 같이 고려되었으므로 다시 AC 양인 고정자축 전류로 변화시켜야 하며 이는 다음 식 (17)과 (18)와 같다.

$$i_{ds}^s = i_{ds}^e \cos \theta - i_{qs}^e \sin \theta \quad (17)$$

$$i_{qs}^s = i_{ds}^e \sin \theta + i_{qs}^e \cos \theta \quad (18)$$

2상전류는 Park's Vector 변환을 통해 3상 고정자축으로 바꿀 수 있으며, 식 (19)~(20)와 같다.

$$i_{as}^s = i_{qs}^s \quad (19)$$

$$i_{bs}^s = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs}^s - \frac{1}{2} i_{ds}^s \quad (20)$$

$$i_{cs}^s = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs}^s + \frac{1}{2} i_{ds}^s \quad (21)$$

#### 4. 제어 시스템 구성

그림 4는 본 논문에서 제시한 유도전동기의 벡터 제어 시스템에 대한 제어 시스템 구성을 나타내고 있으며 DC Power Supply는 태양광 어레이를 대신하여 사용하였다. DC 전압은 태양광 어레이의 전압과 전류를 대신할 수 있는 지령 전압으로 사용되었다. 일사량 변화에 대한 응답특성을 비교적 정밀하게 나타낼 수 있으며, 실험 모델로서 외부환경에 대한 제어량은 고려하지 않았다.

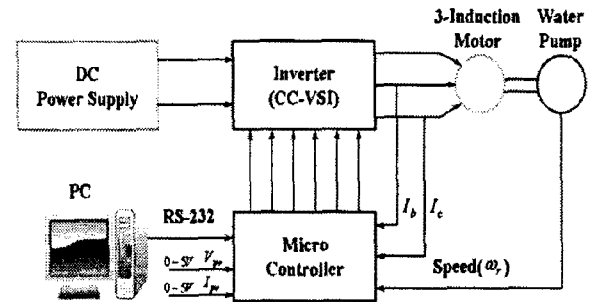


그림 4. 벡터제어를 위한 시스템 구성도  
Fig. 4. Construction of System for Vector Control.

마이크로 컨트롤러는 A/D 컨버터를 통해 B상과 C상의 선전류와 타코미터를 이용하여 전동기의 속도를 입력 받는다. 마이크로 컨트롤러는 PWM 출력 신호를 얻기 위해 처리와 계산을 수행한다. PWM 출력신호는 일사량 변화에 대한 전동기의 속도변화를 위해 고정자 전류의 크기와 주파수를 제어하기 위해 전류제어 전압원 인버터에 입력된다.

그림 5는 본 논문에서 제시한 제어 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

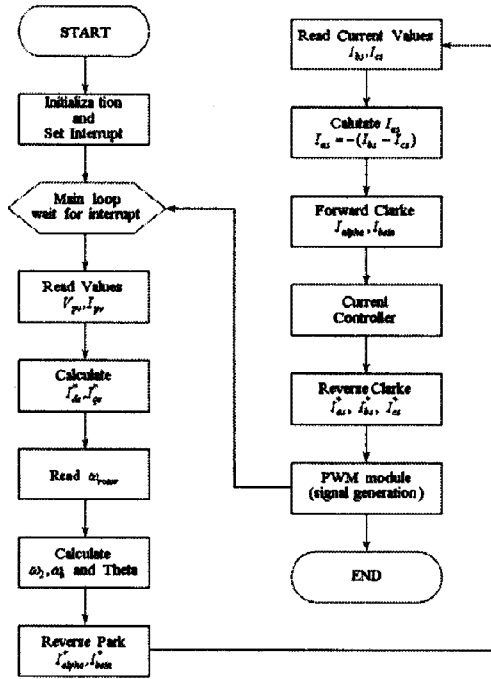


그림 5. 제시한 알고리즘의 순서도  
Fig. 5. Flow chart of proposed algorithm.

## 5. 성능 및 결과

그림 6은 태양광 발전의 시점 즉, 드라이브 시스템의 기동 시 성능 결과이다.  $d, q$  축 전류가 제어됨으로서 벡터제어가 수행됨을 알 수 있으며,  $v_d - v_q$ 의  $90^\circ$ 의 위상차가 나타나게 되어 전동기가 회전함을 알 수 있다.

그림 7은 태양광 발전의 일사량 변동에 대한 성능 결과이며, 일사량 변동에 따라 태양광 발전의 전압과 전류를 변화시켜 최대 전력점이 변화하게 된다. 이는 시스템 전압의 진폭과 주파수를 변화시키게 되고 일사량이 증가할수록 시스템은 점점 더 많은 전력을 받게 되어 전동기의 속도가 증가하게 된다.

그림 8은 스텝 부하의 변화에 대한 성능결과로서 부하가 증가함에 따라  $i_{dq}$ 도 마찬가지로 증가함을 알 수 있다.

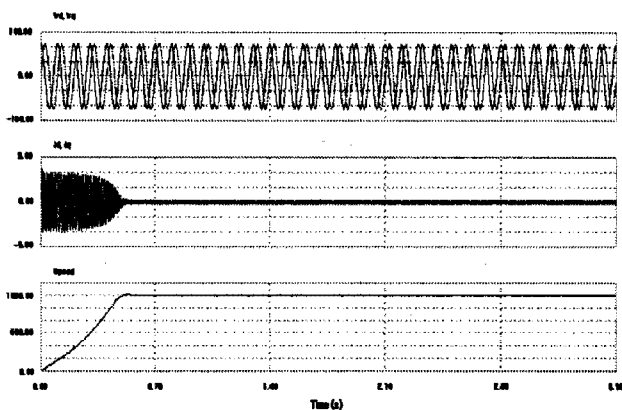


그림 6. 태양광 발전의 기동 시 응답특성  
Fig. 6. Response characteristics of PV during starting

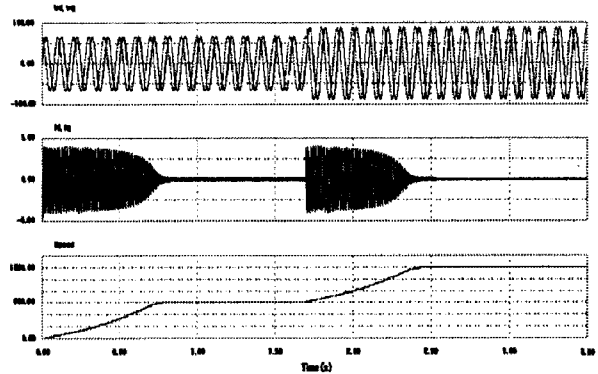


그림 7. 태양광 발전의 일사량 변동에 대한 응답특성  
Fig. 7. Response characteristics of PV with changing insolation

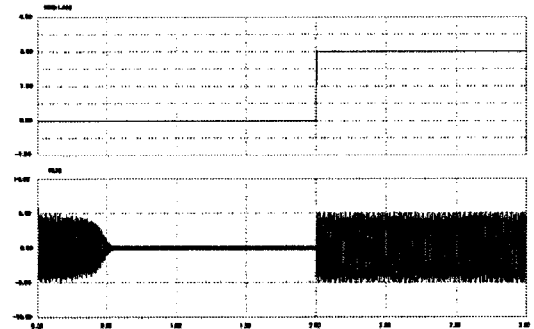


그림 8. 스텝 부하 인가에 대한 응답특성  
Fig. 8. Response characteristics with step load

## 6. 결론

본 논문에서는 실험모델을 이용한 태양광 발전의 출력을 이용하여 유도전동기의 벡터제어를 제시하였다. 태양의 일사량 변화에 대한 조건에 대해 PV 대신 DC 전원을 사용하였다. 일사량 변동에 따른 태양광 전압의 변화에 대해 유도전동기의 속도가 양호하게 나타나고 있으며, 펌프와 같은 부하 변화에서도 양호한 벡터제어 응답특성이 나타나고 있다.

따라서 본 논문에서 제시한 태양광 발전을 이용한 유도전동기의 벡터제어에 대한 타당성을 입증할 수 있었으며, 향후 태양열 온수시스템, 태양광 자동차 등 다양한 분야에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

## 참고 문헌

- (1) E.Koutroulis, K.Kalaitzakis and N.C.Voulgaris, "Development of a microcontroller base, photovoltaic maximum powerpoint tracking control system", IEEE Trans. Power Electronics, vol.16, pp.46-54, Jan. 2001.
- (2) Chihchiang Hua and Chihming Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system", IEEE-PESC Conf. Rec., vol.1, pp.86-93, 1998
- (3) CR Sullivan and M.J. Power, "A high-efficiency maximum power point tracking for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle", IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 574-580, 1993
- (4) Katsumi Ohniwa, Tadao Fujimaki, Yoshihiko Yoda "A New Maximum Power control Method of Photovoltaic Power System", JIEE, vol. B111, no.10, 1991
- (5) F Lasnier and TG Ang "Photovoltaic Engineering Handbook", Adam Hilger
- (6) Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter Topologies using a Matlab PV model", IEAust, vol. 21, pp. 49-56, 2001.