

SPIM 벡터제어를 위한 태양광 발전 시스템

(Photovoltaic System for SPIM Vector control)

고재섭* · 최정식 · 정병진 · 김도연 · 박기태 · 최정훈 · 정동화

(Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Byung-Jin Jung · Do-Yeon Kim · Ki-Tae Park · Jung-Hoon Choi, Dong-Hwa Chung)

Abstract

This paper presents the photovoltaic(PV) water pumping system with a maximum power point tracking(MPPT). The water pumping system uses a variable speed single phase induction motor(SPIM) driven a centrifugal pump by field oriented control(FOC) inverter. The MPPT using a DC-DC converter controlled the duty cycle to track maximum power from PV under different insolation conditions. The duty cycle directly relate with a flux producing current control(i_{ds}). The FOC inverter uses a current control voltage source inverter(CC-VSI). 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

단상 유도전동기는 간단하고 견고하며 신뢰성이 높은 전동기이므로 3상 유도전동기를 적용할 수 없는 가정용이나 공업용으로 널리 사용되고 있다. 단상 유도전동기는 상용화된 전원을 변환장치 없이 직접 사용할 수 있다는 장점이 있다. 현재 국내의 세계적 시장에 나와 있는 단상 유도전동기는 콘덴서를 포함하는 것과 포함하지 않는 권선의 배열을 이용하는 것이 주요 사용되고 있다.[1-3]

단상 전동기는 구조가 간단하고 단상으로 운전되지만 그 구조상 기동토크가 영이므로 별도의 기동장치가 필요하다. 기동장치의 종류에 따라 분상 기동형, 세이딩 코일형, 반발기동형 및 콘덴서 기동형 전동기로 분류한다. 콘덴서 기동전동기는 분상 기동형의 일정으로 보조권선과 직렬로 콘덴서를 접속하여 분상하는 것이다. 그리고 기동이 완료되면 원심력 스위치에 의해 보조권선은 회로에서 분리된다.[4-5]

태양광 발전시스템은 각 모듈의 출력 특성이 일사량, 온도, 부하변동 등에 의해 그 동작점이 변화하게 된다. 따라서 이러한 요소로 인한 변동에 대하여 태양전지는 항상 최대출력을 낼 수 있는 최대출력점 추정(Maximum Power Point Tracking) 제어기법을 적용해야 한다.[7] MPPT 제어기법은 여러 가지 알고리즘이 연구되었으며, 크게 아날로그 방식과 디지털 방식이 있다. 다시 제어대상으로서 정전압 제어방식의 MPPT 알고리즘과 이것을 개선한 P&O(Perturbation and Observation Method) 알고리즘, IncCond(Incremental

Conductance) MPPT 알고리즘, 전류 제한 알고리즘으로 나뉘어진다. 일정전압 제어법은 태양전지 어레이의 동작전압이나 전력에 상관없이 일정하게 제어하는 기법으로 센서를 줄이는 기법 등으로 비용절감을 할 수 있으나 많은 문제점을 가지고 있다. P&O제어법은 태양전지의 최적동작전압이 일사량에 대해서 크게 변하지 않음에 착안한 방법으로 주기적으로 태양전지 전압과 전류를 측정하여 전력을 계산한 후 전력값을 토대로 가장 큰 출력동작점을 추적하는 방법이다. 마지막으로 IncCond 제어법은 P&O 제어법이 빠른 일사량 변동에 대응하지 못함과 최대 전력점 부근에서 왜란되는 것을 개선하기 위한 방법으로 태양전지 전압, 전류를 측정하여 어레이의 단자전압 동작점의 변화에 대해 전력의 변화율이 0이 되도록 제어하는 방법이다. 그러나 이 방법은 계산량이 많아진다는 단점을 가지고 있다.[6-8] 태양전지 최대 출력법은 가능한 한 간단한 회로로 구성하는 것이 바람직하며 효율측면에서도 더 좋다.

본 논문에서는 PV 시스템을 이용한 단상 유도전동기의 구동을 제시한다. 태양광 발전시스템에 MPPT 제어를 적용하여 단상 유도전동기의 전압원으로 사용하며, 단상 유도전동기는 벡터제어를 이용하여 구동하며 응답 특성을 통해 본 논문의 타당성을 입증한다.

2. PV 시스템의 구성

2. 1 태양전지 특성

그림 1은 빛이 조사될 때 광기전력 효과(Photovoltaic

Effect)를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다.

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있다. 실제로는 이상적인 다이오드를 제작하는 것일 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet)저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다. 태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수 함수적으로 감소한다.[9-11]

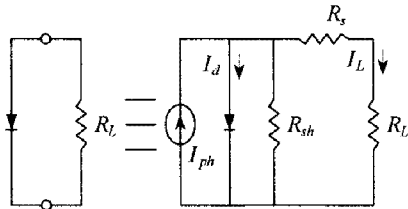


그림 1. 태양전지 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of PV array

여기서 I_{ph} 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어가 외부로부터 방해를 받지 않을 때 폐 회로를 통해 흐르는 광전류이고, I_d 는 암 전류로서 I_{ph} 와는 반대방향이다. 병렬저항 R_{sh} 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s 와 R_L 은 각각 전지 내부에 존재하는 직렬저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타낸다. 태양전지에서 발생하는 전압과 전류의 관계는 심한 비선형 특성을 갖기 때문에, 보다 정확한 시스템 특성을 보여줄 수 있는 전체 시스템의 특성해석을 수행하기 위해서는 태양전지의 모델링이 선행되어야 한다.

2. 2 P&O MPPT 알고리즘

P&O MPPT 제어방법은 간단한 피드백 구조로 되어 있고 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지전압을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 동작하며, 이전의 교란주기동안의 태양전지 어레이 출력 전력과 함께 현재 어레이 출력 전력 비교에 의해 최대전력의 상태를 연속적으로 추적하며 찾는다. 이 방법은 그림 3과 같은 순서도에 의해 동작한다.

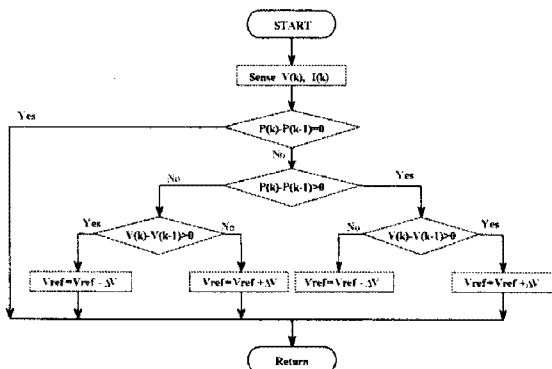


그림 2 P&O MPPT 알고리즘 순서도
Fig. 2. Flow chart of the P&O MPPT Algorithm

만약 전력이 증가하면 교란은 다음 주기 동안 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 의미한다. 그러므로 MPP(Maximum Power Point)에 이르렀을 때 P&O 알고리즘은 일정 혹은 천천히 변하는 환경조건에서 자려진동 할 것이며 그 결과 태양전지 어레이의 손실이 발생하게 된다. 이 문제는 MPP에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기동안의 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위해 P&O 알고리즘의 개선에 의해 해결할 수 있다. 전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란 스텝의 감소가 있다. 그러나 이 방법은 환경조건이 급하게 변할 경우 MPP 추적속도가 늦어지게 되므로 스텝의 결정이 중요하게 되며 급변하는 일사량에서는 적용하기가 힘들게 된다. 그러므로 이 알고리즘은 환경조건이 급하게 변할 경우 P&O MPPT 알고리즘은 MPOP(Maximum Power Operating Point)에서 벗어나게 된다.

그림 3은 P&O 알고리즘을 위한 PSIM 회로도도 나타내고 있다. 이 회로도에서는 기본적으로 태양전지 어레이에 평활 캐패시터와 부스터 컨버터, 부하로 구성하였으며, MPPT 알고리즘을 수행하기 위해 DLL을 구성하여 수행하도록 하였다. DLL은 모두 3부분으로 이루어져 있으며, 각각 파라미터 입력을 위한 태양전지 어레이 부분과 일사량 변동, 그리고 MPPT 수행부분으로 이루어져 있다.

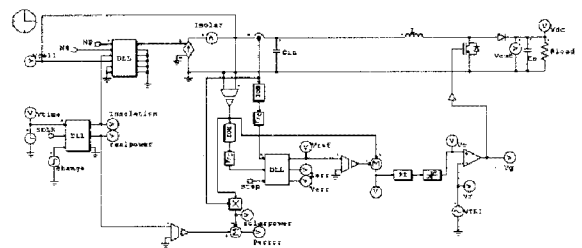


그림 3 PSIM 회로도
Fig. 3. Circuit of PSIM

3. SPIM 모델링

농형 단상 유도전동기의 d-q 모델을 통하여 고찰하면 다음과 같다. 농형 단상 유도전동기는 기동시 한 상으로만 기동토크를 만들 수 없으므로 기동 토크를 만들기 위해서는 단상권선 외에 기동권선을 가지고 있어야 한다. 단상 유도전동기는 주권선과 자기적으로 보통 전기각으로 90도 떨어져 있는 위치에 보조권선이 주권선

과 병렬로 접속되어 있다. 단상 유도전동기는 기동시 2상 운전으로 해석될 수 있다. 그림 4는 단상 유도전동기의 T형 등가 회로도를 나타낸다.

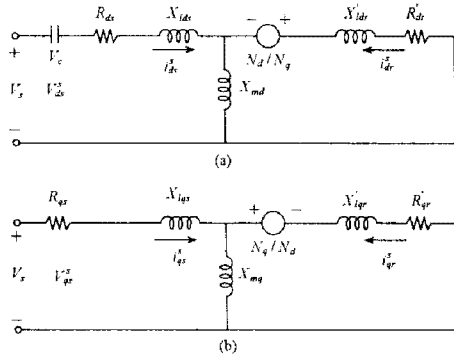


그림 4. T형 등가회로
Fig. 4. T type equivalent circuit

주권선 전압은 다음 식과 같다.

$$V_{qb}^s = V_s \quad (1)$$

보조 권선 전압은 다음 식과 같이 나타낸다.

$$V_{ds}^s = V_s - \frac{1}{c} \int i_{ds}^s dt \quad (2)$$

위의 T형 등가회로도의 전류의 방향을 화살표 방향으로 하여 전압 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{qs}^s &= (R_{qs} + \frac{P}{\omega_b} X_{qs}) \cdot i_{qs}^s + (\frac{P}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{gr}^s \\ V_{ds}^s &= (R_{ds} + \frac{P}{\omega_b} X_{ds}) \cdot i_{ds}^s + (\frac{P}{\omega_b} X_{md}) \cdot i_{dr}^s \\ 0 &= (\frac{P}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{qs}^s - (\frac{N_q}{N_d} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{dr}) \cdot i_{ds}^s \\ &\quad + (\frac{R_{qr+p}}{\omega_b} X_{qr}) \cdot i_{qr}^s - (\frac{N_q}{N_d} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{dr}) \cdot i_{dr}^s \\ 0 &= (\frac{N_d}{N_q} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq}) \cdot i_{qs}^s + (\frac{P}{\omega_b} X_{md}) \cdot i_{ds}^s \\ &\quad + (\frac{N_d}{N_q} \cdot \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{qr}) \cdot i_{qr}^s + (R_{dr} + \frac{P}{\omega_b} X_{dr}) \cdot i_{dr}^s \end{aligned} \quad (3)$$

q축의 파라미터 정의는 다음과 같다.

- R_{qs} : 주권선 1차측 저항
- R_{qr} : 주권선 2차측 (회전자) 저항을 1차측으로 환산한 저항
- X_{lqs} : 주권선 1차측 누설리액턴스
- X_{mq} : 주권선 자화리액턴스 $= (\frac{N_q}{N_r}) \cdot X_{mr}$

X_{lqr} : 주권선 2차측 자기리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

$X_{qs} = X_{lqs} + X_{mq}$: 주권선 1차측 자기리액턴스

$X_{qr} = X_{lqr} + X_{mq}$: 주권선 2차측 자기리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

N_q : 주권선 1차측 권선비

N_r : 2차측 (회전자) 권선에 대한 유효 권수비

X_{mr} : 주권선 1차측 2차측 상호리액턴스

d축의 파라미터 정의는 다음과 같다

R_{ds} : 보조권선 1차측 저항

R_{dr} : 보조권선 2차측 저항을 1차측으로 환산한 저항

X_{lds} : 보조권선 1차측 누설리액턴스

$X_{md} = (\frac{N_d}{N_r}) \cdot X_{ar}$: 보조권선 자화리액턴스

X_{ldr} : 보조권선 2차측 누설리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

$X_{ds} = X_{lds} + X_{md}$: 보조권선 1차측 자기리액턴스

$X_{dr} = X_{ldr} + X_{md}$: 보조권선 2차측 자기리액턴스를 1차측으로 환산한 리액턴스

N_d : 보조권선의 권선비

X_{ar} : 보조권선과 회전자 권선과의 상호 리액턴스

그 외의 파라미터는

V_s : 전원 전압

P : 미분 연산자

i_{qs} : 주권선 전류

i_{qr} : 주권선 전류로 환산한 회전자측 전류

i_{ds} : 보조권선 전류

i_{dr} : 보조권선 전류로 환산한 회전자측 전류

ω_b : 동기각속도, ω_r : 회전자 각속도

각각의 전류는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{ds}^s &= (\lambda_{ds} - \lambda_{dm}) / L_{lds} \\ i_{qs}^s &= (\lambda_{qs} - \lambda_{qm}) / L_{lqs} \\ i_{dr}^s &= (\lambda_{dr} - \lambda_{dm}) / L_{ldr} \\ i_{qr}^s &= (\lambda_{qr} - \lambda_{qm}) / L_{lqr} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 λ_{qm} 과 λ_{dm} 은 전동기의 공극 자속으로 다음식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}\lambda_{qm} &= \lambda_{qs} - L_{lqs} \cdot i_{qs}^s \\ \lambda_{dm} &= \lambda_{ds} - L_{lds} \cdot i_{ds}^s\end{aligned}\quad (5)$$

위 전류의 값에 의해서 토크의 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{P N_d X_{mq}}{2 N_q \omega_b} (i_{qs}^s \cdot i_{dr}^s - i_{ds}^s \cdot i_{qr}^s) \quad (6)$$

P : 전동기의 극수 (pole)

4. 시스템 설계

단상 유도전동기의 벡터제어 원리는 일사량 변동에 대한 고효율 드라이브와 양호한 동적응답을 위해 i_{qs}, i_{ds} 를 직접 제어한다. 시스템의 최대 효율 운전을 위해 위의 두 전류는 최적으로 설정된다. 태양광 발전 전력과 유도전동기의 출력 및 속도특성은 다음과 같다.

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

$$P_{pv} = P_{out} = K \omega^3 \quad (8)$$

유도전동기의 전기적인 토크는 다음 식에 의해 결정된다.

$$T_e^* = K \omega_r^2 + \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (9)$$

벡터제어 시스템에서는 $i_{dr}^s = 0$, $i_{qr}^s = n i_{qs}^s$ 이므로 식(9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}T_e^* &= \frac{P}{2} L_{mq} |i_{dr}^s i_{qs}^s - i_{qr}^s i_{ds}^s| \\ &= \frac{P}{2} n L_{mq} i_{ds}^s i_{qs}^s\end{aligned}\quad (10)$$

n : 주권선과 보조권선의 턴수 비

유도전동기의 q 축 전류는 식(10)으로부터 구할 수 있으며, 이 전류는 q 축 지령 전류가 된다.

$$i_{qs}^* = \frac{T_e^*}{\frac{P}{2} n L_{mq} i_{ds}^*} \quad (11)$$

또한, 자속을 만드는 i_{ds} 는 자화전류(i_{mr})에 해당되며, 이는 태양광 발전의 최대전력 추적 시스템으로부터 얻은 전압에 의한 유도전동기 개방회로 시험에 의해 결정된다.

$$i_{mr}^* = \frac{1}{(1-D)} \cdot \frac{V_{pv}}{(L_{ls} + L_m)} \quad (12)$$

식(12)에 의해 구해진 자화 전류로부터 d 축 지령전류인 i_{ds}^* 를 구할 수 있으며 유도전동기의 슬립 주파수는 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

$$i_{ds}^* = T_R \frac{d}{dt} i_{mr}^* + i_{mr}^* \quad (13)$$

$$\omega_2 = \frac{r_r}{L_r} \cdot \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \quad (14)$$

그림 5는 본 논문에서 제시한 제어시스템의 블록도를 나타내고 있다.

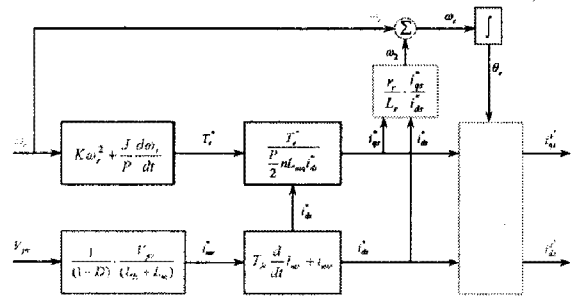


그림 5. 제시한 제어 시스템 블록도
Fig. 5. Proposed control system block diagram

5. 시스템 성능 및 결과

본 논문에서는 드라이브 시스템의 특성과 성능을 평가하기 위해 PSIM을 사용하였다. 시뮬레이션은 시스템의 기동과 일사량 변동 및 스텝 부하 인가시의 성능을 나타낸다.

그림 6은 P&O 알고리즘의 응답특성으로 그림3의 회로도를 구현한 결과이며 실제 일사량과 부하에 따라 어레이에서 나올 수 있는 최대전력과 MPPT 수행 후 전력을 비교하여 나타내었으며, 전력오차가 0으로 수렴되고 있으며, MPPT 양호하게 추정되고 있음을 알 수 있다.

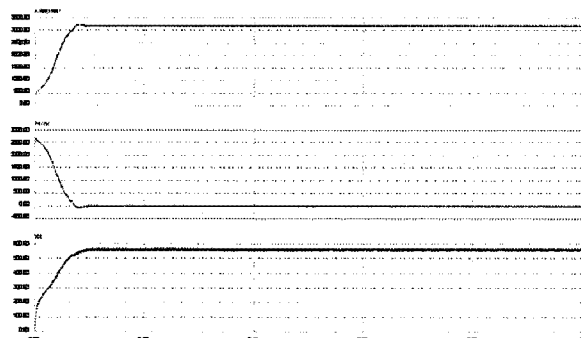


그림 6. P&O 알고리즘의 응답특성
Fig. 6. Response characteristics of P&O algorithm

그림 7은 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° 의 위상차가 나타나게 되어 전동기가 회전함을 알 수 있다.

그림 8은 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 9는 스텝 부하의 변화에 대한 성능결과로서 부하가 증가함에 따라 i_{dqs} 도 마찬가지로 증가함을 알 수 있다.

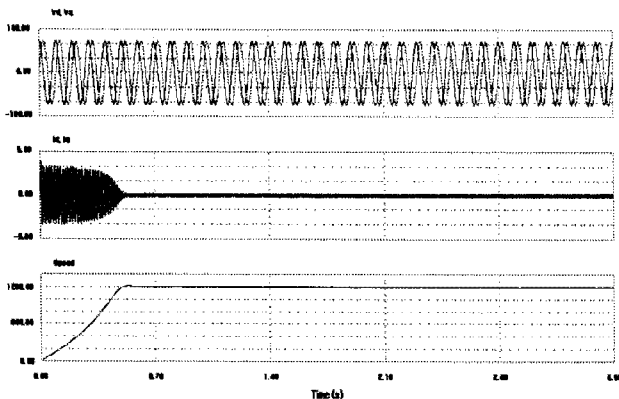


그림 7. 태양광 발전의 기동 시 응답특성
Fig. 7. Response characteristics of PV during starting

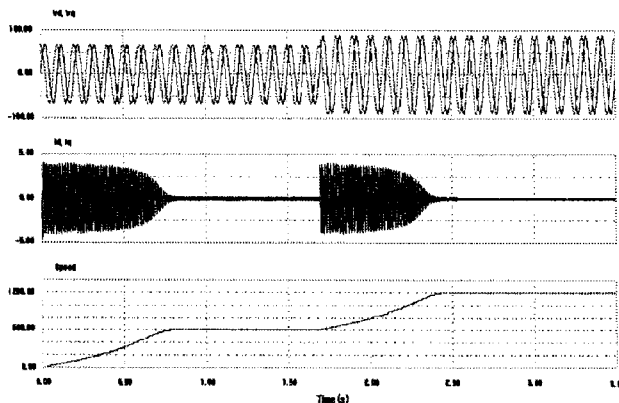


그림 8. 태양광 발전의 일사량 변동에 대한 응답특성
Fig. 8. Response characteristics of PV with changing insolation

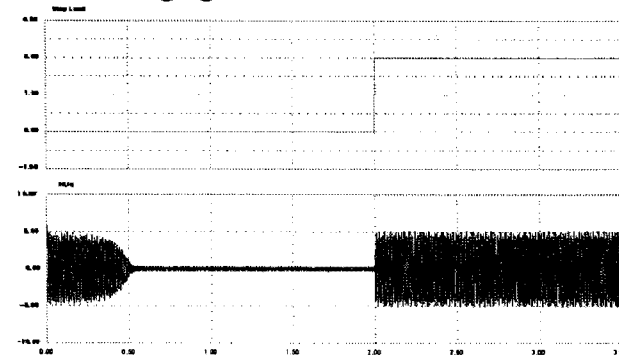


그림 9. 스텝 부하 인가에 대한 응답특성
Fig. 9. Response characteristics with step load

6. 결론

본 논문에서는 PV 시스템을 이용한 단상 유도전동기의 벡터제어를 제시하였다.

PV 시스템은 MPPT 제어를 통해 단상 유도전동기의 전압원으로 사용하였다. 일사량 변동에 따라 태양광 발전의 MPPT 제어를 통해 단상 유도전동기의 전압 및 속도 역시 변화하였으며, 벡터제어를 통해 제어하였다.

본 논문에서 제시한 PV 시스템을 이용한 단상 유도전동기의 벡터제어 시스템은 상용전원을 사용할 수 없는 곳에서도 태양광 발전을 이용하여 단상 유도전동기를 구동할 수 있었다. 그리고 펌핑 시스템, 태양열 온수 및 태양열 자동차 등 다양한 분야에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] S. D. Umans, "Steady-state lumped parameter model for capacitor-ren single-phase induction motors." IEEE Trans. Ind. Application, vol. 32, pp. 169-179, Jan/Feb. 1996
- [2] N. N. Hancock, Matrix Analysis of Electrical Machinery, 2nd ed. New York : Pergamon. 1974
- [3] S. Williamson and K. Mirzoiian, "Analysis of cage induction motors with stator winding faults," IEEE Trans. Power APP. Syst, vol. PAS-104, pp. 1838-1842, July 1985.
- [4] S. Williamson and E. R. Laithwaite, "Generalized harmonic analysis for the steady-state performance of sinusoidal-excited cage induction motors," Proc. Inst. Elect. Eng., vol 132, pt.B, pp. 157-163, May 1985
- [5] S. williamson. T. J. Flack, and A. F. volschenk, "Representation of skew in time-stepping two-dimensional finite-element models of electrical machines," IEEE Trans. Ind. Application., vol. 31, pp. 1009-1016, Sept/Oct 1995
- [6] F Lasnier and TG Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", Adam Hilger
- [7] Katsumi Ohniwa, Tadao Fujimaki, Yoshihiko Yoda " A New Maximum Power control Method of Photovoltaic Power System", JIEE, vol. B111, no.10, 1991
- [8] 박창엽, "에너지 변환공학", 김영사, pp. 2-50.
- [9] 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.
- [10] Yeong-Chau Kuo, Tsomg-Juu Liang and Jiann-Fuh Chen, "Novel Maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system", IEEE Trans. Ind. Electronics., vol. 48, pp.594-601, June. 2001.
- [11] 유권중, 정영석, 최주엽 "고주파 절연변압기를 사용한 태양광용 인버터 개발"