

유도전동기 드라이브 구동을 위한 태양광 발전의 최적화 제어

김도연, 고재섭, 최정식, 정병진, 정동화
 순천대학교

Optimal Control of Photovoltaic Generation for Induction Motor Driving

Do-Yeon Kim, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Byung-Jin Jung, Dong-Hwa Jung
 Suncheon National University

Abstract - This paper proposed design and development of a photo voltaic (PV) array fed induction motor drive. A drive system using a chopper circuit to track maximum power from the PV for different solar insolation and a current controlled voltage source inverter (CC-VSI) to optimally match the motor to PV characteristics is presented. The model equations governing interaction of torque and flux producing components of motor current with available solar power is developed for the operation of the system at optimum efficiency. Performance of the system is presented for different realistic operating conditions, which demonstrates its special features for applications such as solar water pumping system, solar vehicles and floor mills located in hilly and isolated areas.

1. 서론

태양광 발전은 미래 에너지를 충족시키는 중요한 요소로 잘 알려져 있다.[1] 환경 친화적, 낮은 운용가격, 공급 지속력은 태양 에너지가 가장 적합한 에너지원이다.[2] 특히, 낙도 등의 전력 수요를 충족시키는 유일한 에너지원이다. 솔라 에너지는 이용 가능한 형태로 사용 가능하기 전에 많은 에너지 변환을 해야 한다. 현재까지, 에너지 변환에는 많은 비용이 들었지만, 전력 상태를 위한 저가의 장치와 반도체 기술의 빠른 발전으로 가능하게 되었다. PCS는 PV 어레이와 부하 사이에 인터페이스로 동작한다. 본 논문에서 제시한 유도전동기 구동을 위한 태양광 발전에서는 PCS가 전동기 구동에 적절한 PV 어레이 모델로 제어할 수 있게 한다. 유도전동기는 속도와 부하에 관련되어 최대 효율을 제어할 수 있어 최근, 워터 펌프에 등에 사용되고 있다.[3][4] 그러나 태양광 발전 시스템에서는 일사량이 다양하게 변화되어 전동기의 동작은 비선형이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 동작 최적 레벨에서 시스템의 운용에 의해, MPPT 알고리즘에 유도전동기의 특성이 매칭 되도록 시간과 일사량의 변화는 레벨에 PV의 최대 전력점을 추적하게 된다. 최적의 효율에서 유도전동기 드라이브 시스템의 동작은 보통 전동기의 고정된 손실을 가변 손실과 같게 한다. 이는 실제 태양광 발전의 전력과 전동기 코일 전류의 토크와 가속으로 나타난다.[5][6]

따라서 본 논문에서는 태양광 발전 전력에 대한 유도전동기의 최적 운전을 위해 PCS 제어기법을 제시한다. PCS에서는 MPPT 제어에서는 초과제어를 통해 수행하며, CC-VSI를 이용하여 유도전동기의 제어를 실현한다. 또한 일사량 변화에 따른 전동기의 응답특성을 제시함으로써 논문의 타당성을 입증한다.

2. 시스템의 모델링

2.1 태양전지 모델링

그림 1은 태양전지의 등가회로를 보여주며 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_c 과 일치하고, 다이오드 포화전류 I_o 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다[7][8].

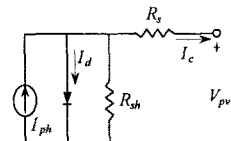


그림 1. 태양전지 등가회로.
 Fig. 1. Equivalent circuit of PV array.

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

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.

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

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.

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

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

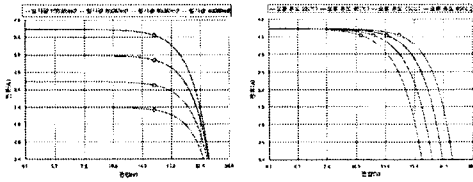
$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_o} \right]^3 e^{\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (5)$$

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

여기서, I_{ph} 는 광전류, S_N 은 단위 일사량, I_o 는 단락전류 온도계수[A/K], I_d 는 다이오드 전류, R_s 는 직렬저항, R_{sh} 는 병렬저항, T_c 는 태양전지 온도[K], T_o 는 태양전지 기준온도[K], A, B 는 제조상수, I_{or} 은 역포화 전류, E_g 는 에너지 밴드갭을 의미한다.

태양전지 셀의 특성은 V-I 특성곡선의 동작에 따라 이해할 수 있다. 이러한 특성 곡선은 태양전지 셀의 현재 동작에 따라 생성된다. 그림 2의 (a)는 다양한 일사량에 대한 V-I 관계를 나타내고 (b)는 온도변화에 따른 V-I 특성곡선을 나타낸다. 그림2에서와 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.



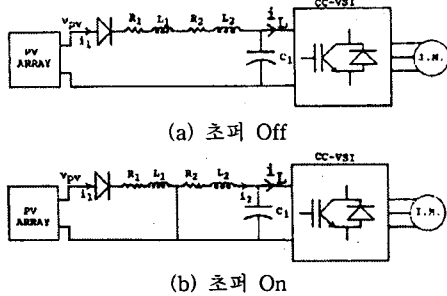
(a) 일사량 변화 (b) 온도 변화
그림 2. 태양전지의 V-I 특성곡선.

Fig. 2. V-I characteristic curve of solar cell.

2.2 초퍼와 LC 필터의 모델링

PV 어레이는 LC필터의 DC 링크단 동작을 위해 전력을 공급한다. 시스템의 이 부분의 동작은 아래의 미분 방정식으로 구해진다.

초퍼가 off될 때, 그림 3(a)과 같이 나타낼 수 있으며 식(5)-(6)로 정의된다. 반면 초퍼가 ON 될 경우에는 그림 3(b)와 같이 나타낼 수 있으며 식(7)-(9)로 정의된다.



(a) 초퍼 Off (b) 초퍼 On
그림 3. 초퍼에 의한 전력회로
Fig. 3. Power circuit by chopper

$$pv_1 = [(v_{pv} - v_1)/(L_1 + L_2) - (R_s + R_i + R_2)/(L_1 + L_2)i_1] \quad (5)$$

$$pv_1 = (i_1 - i_L)/C_1 \quad (6)$$

$$pi_1 = v_{pv}/L_1 - (R_s + R_i)/L_1 i_1 \quad (7)$$

$$pi_2 = -v_1/L_2 - (R_2/L_2)i_2 \quad (8)$$

$$pv_1 = (i_2 - i_1)/C_1 \quad (9)$$

여기서 p는 미분 연산자를 나타내고 있다.

3. 제어 알고리즘 설계

LC필터와 CC-VSI는 전동기와 PV 어레이 시스템 사이의 제어 장치로 적용된다. d, q축의 두 전류(i_{ds}^* 와 i_{qs}^*)는 드라이브의 최대 효율 동작을 위해 설정되며, 제어 인자로서 작용된다. PV 어레이의 출력전력은 다음 식(10)과 같다.

$$P_{pv} = p_{act} = v_{pv} i_1 \quad (10)$$

p_{act} 는 PV 어레이의 실제 출력이다.

PV 어레이의 출력이 유도전동기에 공급된다고 가정하면 전력과 유도전동기의 속도특성은 다음 식(11)으로 표현할 수 있다.

$$P_{pv} = p_{act} = p_i = k_1 w_m + k_2 w_m^3 \quad (11)$$

여기서 k_1 와 k_2 는 상수이고 W_m 은 모터의 기계속도이다. 자화 전류 벡터(i_{mr}^*)의 레퍼런스 값은 전동기의 속도 W_m 함수 식(12)으로 나타낼 수 있다.

$$i_{mr}^* = fn(W_m) \quad (12)$$

PV어레이에 의해 공급되는 전력을 위해 전동기는 속도에 대한 토크 응답으로 나타낼 수 있으며, 지령 토크 값은 식 (13)과 같다.

$$T^* = p_{pv}/W_m = p_i/W_m \quad (13)$$

여기서 p_i 는 전동기의 입력 전력이다.

고정자 전류 벡터의 자속 성분 전류(i_{ds}^*)와 토크 성분 전류(i_{qs}^*)는 식 (14)-(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{ds}^* = i_{mr}^* + \tau_r p(i_{mr}^*) \quad (14)$$

$$i_{qs}^* = T^*/(K_t i_{mr}^*) \quad (15)$$

$$K_t = (3/2)(poles/2)M^2/(1 + \sigma_r) \quad (16)$$

여기서 M 은 상호 인덕턴스, σ_r 는 회전자 누설계수, τ_r 는 회전자 시정수를 나타낸다.

드라이브의 최적 효율에 요구되는 슬립 주파수는 다음 식(17)으로 계산된다.

$$W_s^* = i_{qs}^*/(\tau_r i_{mr}^*) \quad (17)$$

전류 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 가 동기 회전 기준축에서 표현되기 때문에 DC 량으로 고려된다. AC로 변환하기 위해서, 이 전류는 $e^{j\psi}$ 로 표시되는 벡터 회전자에 의해 회전된다. ψ 는 고정축과 자기 축 사이의 각인 자속각이고, 이산 데이터 제어에서 자속각 ψ 는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\varphi(n) = \varphi(n-1) + (W_r(n) + W_s^*)t_n \quad (18)$$

또한 3상 지령 전류는 다음 식 (19)-(20)에 의해 구할 수 있다.

$$i_{ds}^* = i_{ds}^* \cos \psi - i_{qs}^* \sin \psi \quad (19)$$

$$i_{qs}^* = i_{ds}^* \sin \psi - i_{qs}^* \cos \psi$$

$$i_{as}^* = i_{qs_s}^*$$

$$i_{bs}^* = (\sqrt{3}/2)i_{qs_s}^* - (1/2)i_{ds_s}^*$$

$$i_{cs}^* = -(\sqrt{3}/2)i_{qs_s}^* - (1/2)i_{ds_s}^* \quad (20)$$

4. 실험 및 결과

그림 4는 본 논문에서 제시한 최적 제어 알고리즘의 시스템 블록도이다. DC 전력은 일사량의 변화에 따른 태양전지 판넬의 출력에서 사용된다. 태양전지 판넬에서 최대전력을 얻기 위해, 초퍼 제어 회로를 결합시켰고, PV의 출력은 CC-VSI로 입력된다. CC-VSI는 제어된 주파수로 여자 원으로 동작하고, 유도전동기 드라이브의 전원을 공급한다. 태양에너지의 효과적인 이용을 위해, 드라이브의 최적 효율의 동작이 모터의 동작 범위 내로 요구된다. 이는 모터 전류의 자속과 토크사이의 적절한 균형을 유지하여 수행할 수 있다. 전동기 전류의 토크와 자속은 논리적으로 PV 어레이의 출력의 전력과 관련이 있다. 그러므로 이용 가능한 전력은 유용한 기계적 전력으로 최적적으로 변환된다.

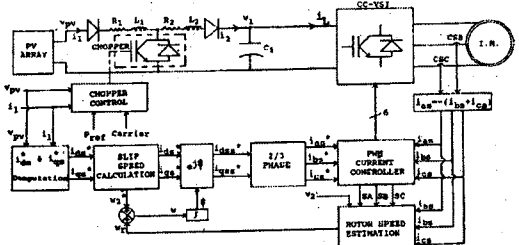


그림 4. 제시한 알고리즘의 시스템 블록도
Fig. 4. System block diagram of proposed algorithm

그림 5는 기동과 정상상태 운전(일사량 600)에서 시스템의 응답을 보여준다. 그림 5(a)와 5(b)는 모터의 속도가 증가함에, 부하 토크 역시 증가하고 정상상태에서는

드라이브에 의해 생성된 전자기 토크와 같아진다. 그림 5(c)와 5(d)에서는 전동기가 제어된 주파수에서 기동하는 것을 나타낸다. 모터의 속도가 증가하면, 전동기의 제어 알고리즘에서 얻어진 3상 레퍼런스 전류의 주파수는 증가하고 코일 전류는 지령 전류에 정확히 일치한다.

그림 6은 높은 일사량에서 드라이브 시스템의 응답을 나타낸다. 이 경우 정상상태에서 동작 속도는 1350[rpm]으로 높게 나타났다. 이런 사실은 낮은 일사량과 비교하여 높은 토크 2.3N-m으로 현재 운전 중임을 알 수 있다. 그림 6(c)과 6(d)은 코일 전류가 전동기의 제어 알고리즘에 의해 만들어진 전류와 정확히 일치하는 것을 보여준다.

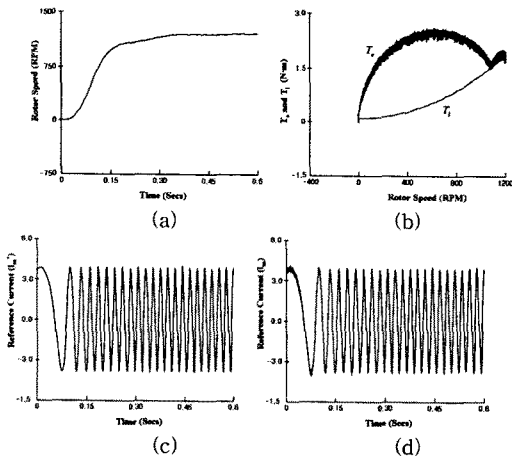


그림 5. 전동기의 응답특성(저 일사량)
Fig. 5. Response characteristic of motor (low insolation)

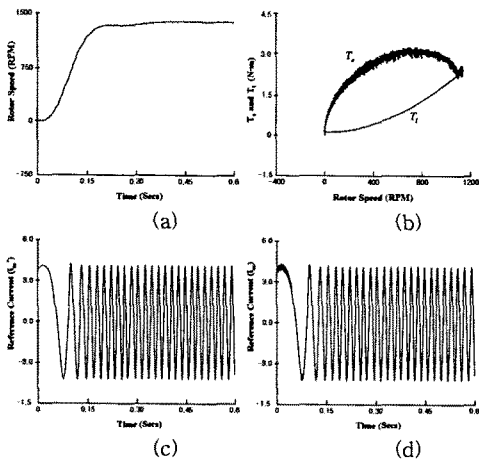
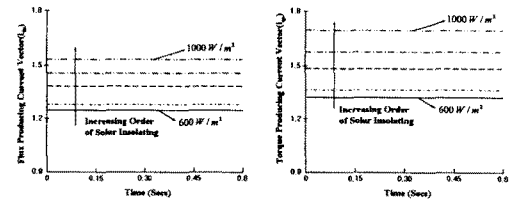


그림 6. 전동기의 응답특성(고 일사량)
Fig. 6. Response characteristic of motor (high insolation)

그림 7은 일사량 변화에 따른 고정자 전류 벡터 성분을 나타내고 있다. 드라이브 시스템의 효율 최적화는 변수와 고정된 값을 조정함으로써 고정자 전류 벡터 성분을 만드는 자속과 토크의 다른 값의 선택으로 가능하게 되었다. i_{ds} 와 i_{qs} 의 특정 레벨은 일사량의 따라 결정되며, 다른 일사량에서, 두 전류 성분(i_{ds} , i_{qs})은 다르게 나타난다. 그러므로 이 두 전류의 모든 레벨은 정상상태 조건 동안 드라이브 시스템의 최적 효율을 나타낸다.



(a) d축 전류 (b) q축 전류

그림 7. 고정자 전류 벡터 성분
Fig. 7. Vector component of stator current

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 전력을 이용한 유도전동기의 최적제어를 제시하였다. 유도전동기는 비선형 특성을 갖는 부하로서 태양광 발전을 전원으로 사용할 경우 일사량 변화에 따른 응답특성이 현저히 떨어진다. 이러한 문제점을 태양광 발전의 MPPT 제어를 수행하는 초퍼와 전동기 주파수제어를 위한 CC-VSI를 사용하여 개선할 수 있었다.

논문에서 제시한 알고리즘으로 일사량 변화에 따른 유도전동기의 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 또한 고정자 전류 성분 벡터는 일사량 변화에 따라 레벨이 다르게 나타나므로 최적제어를 수행함을 알 수 있었으며, 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증하였다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술평단의 지원으로 수행된 연구결과임.

[참 고 문 헌]

- [1] Jewell W.T. and Ramkumar R., "The history of utility-interactive photovoltaic generation", Proc. of IEEE/PES 1988 Winter Meeting, New York, No.88WM237, pp.1-5, Jan.31-Feb.2, 1988.
- [2] Applebaum J. and Sarma M.S., "The operation of permanent magnet dc motors powered by a common source of solar cells", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-4, No.4, pp.635-641, December 1989.
- [3] Yao Y., Bustamante P. and Ramshaw R.S., "Improvement of induction motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.9, No.2, pp.256-262, June 1994.
- [4] Bhat S.K., Pittet A. and Sonde B.S., "Performance optimization of induction motor pump system using photovoltaic energy source", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-23, No.6, pp.995-1000, Nov/Dec. 1987.
- [5] M.H. Salama, "A simplified approach for determining the minimum input power conditions for induction motors fed from variable frequency sources", Electric Machines and Power Systems, Vol. 11, No.1, pp.41-51, January 1986.
- [6] Jian T.W., Schmitz N.L. and Novotny D.W., "Characteristic induction motor slip values for variable voltage part load performance optimization", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 1, pp.38-46, January 1983.
- [7] 김형석, 박정민, 외 3인, "마이크로 콘트롤러를 이용한 태양 광발전용 승압초퍼용 MPPT 제어기에 관한 연구"
- [8] Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter Topologies using a Matlab PV model", IEAust, vol. 21, pp. 49-56, 2001.