

부하를 고려한 DC-DC 컨버터의 듀티비에 따른 태양광 발전 시스템의 최대전력점 추적

(MPPT of photovoltaic system with duty ratio of DC-DC converter considered load)

진영선* · 고재섭 · 최정식 · 정철호 · 김도연 · 정병진 · 정동화

(Young-Sun Jun* · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Chul Ho Jung · Do-Yeon Kim · Byung-Jin Jung · Dong-Hwa Chung)

Abstract

This paper presents a maximum power point tracking(MPPT) of photovoltaic system with duty ratio of DC-DC converter considered load. A variation of solar irradiation is most important factor in the MPPT of PV system. That is nonlinear, aperiodic and complicated. NN was widely used due to easily solving a complex math problem.

The paper consists of solar radiation source, DC-DC converter, DC motor and load(cf, pump). NN algorithm apply to DC-DC converter through an adaptive control of neural network, calculates converter-duty ratio using an adaptive control of NN. The results of an adaptive control of NN compared with the results of converter-duty ratio which are calculated mathematical modeling and evaluate the proposed algorithm. The experimental data show that an adequacy of the algorithm was established through the compared data.

1. 서 론

최근 이산화탄소 감소 의무화 등의 환경적 이슈에 따라 신재생 에너지 연구에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 PV 시스템은 그 영역이 급격하게 확장되고 있으며, 전기 전력 기술에서도 그 역할이 증가되고 있다. 태양전지 어레이와 분권 DC전동기의 최적운전 조건은 태양전지의 스위칭 기법과 전동기 자속 제어와 같은 직류 변압기에 의해 이루어졌다[1]. Appelbaum은 PV 전압원으로부터 공급되는 DC 전동기의 성능을 분석했다[2]. DC 전동기의 성능 분석은 컨버터를 통한 PV 공급으로부터 제시된다[3]. Saied는 태양광 발전에 적합한 전동기의 최적 파라미터를 결정을 공식화했다[4]. 신경회로망은 복잡한 사상 모델링과 시스템에서 신경회로망의 능력은 입증되었다[5]. 본 논문은 부하를 고려한 DC-DC 컨버터의 듀티비에 따른 태양광 발전 시스템의 최대전력점 추적을 제시한다. 컨버터 듀티비는 연결된 시스템에 태양전지 어레이 또는 GME(Gross Mechanical Energy)으로부터 최대 출력을 얻기 위하여 신경회로망을 사용하여 계산하고 결과분석을 통하여 알고리즘의 타당성을 입증한다.

2. 시스템의 수학적 모델링

PV 시스템은 요구된 출력 전압 및 전류를 공급하기

위하여 직렬 및 병렬의 형태로 연결된 많은 PV 셀의 조합으로 구성되어 있으며 V-I특성은 다음과 같다.

$$V_x = -I_x R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) + \left(\frac{N_s}{\Lambda} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{N_s I_{ph} - I_x}{N_p I_o} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서, N_p 는 셀의 병렬개수, N_s 는 셀의 직렬개수, $\Lambda = q / AKT$, q 는 전하, A 는 제조상수, K 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도이다. 그림 1은 태양전지 어레이의 등가 회로를 나타낸다.

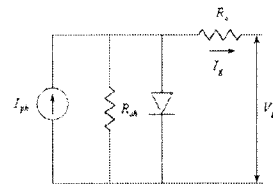


그림 1. PV시스템의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of the PV system

식 1에서 셀 상수를 대입한 후에 V-I 특성 결과를 간략화 하면 다음과 같다.

$$V_x = -0.9I_x + 23.697 \ln \{ 1.0 + 123.456(13.45K_m - I_x) \} \quad (2)$$

여기서 I_x, V_x 는 각각 태양전지 어레이의 출력 전류,

및 전압을 나타내고 K_m 는 일사량을 나타낸다.

$$V_m \delta_{mp}^2 - E_b \delta_{mp} - I_m R_o = 0 \quad (11)$$

2.2 컨버터 모델링

DC-DC 컨버터는 듀티비 또는 듀티비를 변화할 수 있는 Buck-Boost 컨버터를 나타낸다. 컨버터가 이상적이라고 가정하면, 듀티비 δ 에 대하여 컨버터의 출력 전압 및 전류와 태양전지 어레이 전압(V_s) 및 전류(I_s)에 대하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$V_{av} = \frac{\delta V_g}{(1-\delta)} \quad (3)$$

$$I_{av} = \frac{I_g(1-\delta)}{\delta} \quad (4)$$

$$\delta = \left(\frac{I_{av}}{I_p} \right) \quad (5)$$

$$Y = \frac{\delta}{(1-\delta)} \quad (6)$$

여기에서 δ 는 듀티비, Y 는 초핑 비, I_p 는 컨버터의 스위칭 주기이다.(buck : $\delta < 0.5$, Boost : $\delta > 0.5$)

3. 시스템의 최대 전력 운전

3.1 태양전지의 최대전력 운전

컨버터의 듀티비는 태양전지의 출력과 전동기 부하 특성에 따라 변화한다. 전동기에 의해 흡수된 전력은 태양전지 어레이에 의해 전송된 전력과 같다. 즉,

$$P_m = V_{av} I_{av} = V_m I_m \quad (7)$$

여기에서 V_{av} , I_{av} 는 전동기 전기자 전압 및 전류이고, V_m , I_m 은 각각 태양전지 어레이의 최대 전력점에서 태양전지 전압 및 전류이다. 전동기 전기자 전압 및 전류는 아래와 같이 최대 전력점에서 태양전지 전압 및 전류의 향으로 표현된다.

$$V_{av} = \delta_{mp} V_m \quad (8)$$

$$I_{av} = \frac{I_m}{\delta_{mp}} \quad (9)$$

$$V_{av} = E_b + I_{av} R_o \quad (10)$$

그림 2와 같이 식(10)에 (8), (9)를 대입하여 태양전지 어레이 측면에서 등가회로를 변형하면 전동기 전기자 전압 식은 다음과 같다.

이 때, 컨버터의 듀티비는 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{mp} = \frac{E_b}{2V_m} + \left(\left(\frac{E_b}{2V_m} \right)^2 + \left(\frac{I_m R_o}{V_m} \right) \right)^{1/2} \quad (12)$$

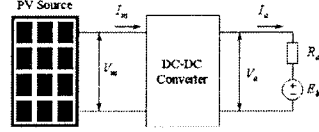


그림 2. 전체 시스템의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of total system

태양전지의 최대 전력을 인가하기 위한 전동기 전기자 전류는 식(13)과 식(14)로부터 얻을 수 있다.

$$P_m = E_b I_{av} + I_{av}^2 R_o \quad (13)$$

$$R_o I_{av}^2 + E_b I_{av} - P_m = 0$$

$$I_{av} = -\frac{E_b}{2V_m} + \left(\left(\frac{E_b}{2V_m} \right)^2 + \left(\frac{P_m}{R_o} \right) \right)^{1/2} \quad (14)$$

위의 식으로 계산된 값은 신경회로망 학습을 위하여 참조 패턴으로 사용한다.

3.2 최대 기계적 에너지 출력 운전

주어진 기기의 자속 계수에 대하여 모든 일사량에서 최대 전력점(P_m , V_m , I_m)으로 운전하기 위한 전동기나 태양전지를 만드는 것은 불가능하다. 이것은 V-I 특성이 기기에서 동손과 자속 계수에 의존하기 때문이다. 이런 경우에 시스템은 주어진 일사량 곡선에 대하여 기계적 에너지 출력의 점(P_m^* , V_m^* , I_m^*)에서 운전하게 되며 동작점의 경로는 그림 3과 같다. 이러한 동작점에서 $V_m^* > V_m$, $I_m^* < I_m$ 이다.

$$V_m^* = \frac{V_m(2R_o + 89.8I_m^{0.127})}{(R_o + I_m^{0.127})} \quad (15)$$

$$I_m^* = \frac{89.8I_m^{0.127}}{(R_o + I_m^{0.127})} \quad (16)$$

$$P_m^* = V_m^* I_m^* \quad (17)$$

$$I_{av}^* = -\frac{E_b}{2V_m} + \left(\left(\frac{E_b}{2V_m} \right)^2 + \left(\frac{P_m^*}{R_o} \right) \right)^{1/2} \quad (18)$$

최대 기계적 에너지의 동작을 위한 buck -boost 컨버터의 듀티비는 아래 식으로부터 얻어진다.

$$\delta_{mpg}^* = \frac{E_h^*}{2V_m^*} + \left(\left(\frac{E_h^*}{2V_m^*} \right)^2 + \left(\frac{I_m R_{\Omega}}{V_m^*} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (19)$$

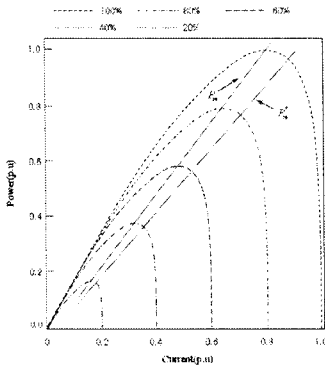


그림 3. 다양한 일사량에서 태양전지의 최대 전력점 및 최대 기계적 에너지 동작 곡선
Fig. 3 MP and GME operation points trajectory of solar cell array at different solar insulations

4. 신경회로망 제어기

그림 4는 본 논문에서 제시한 2개의 입력층, 4개의 은닉층, 1개의 출력층을 가진 신경회로망의 구조를 나타낸다.

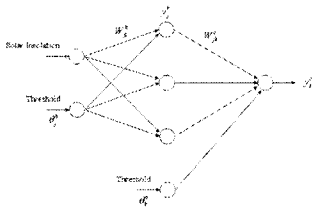


그림 4. 신경회로망의 구조
Fig. 4 Structure of neural network

입력 벡터 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$ 는 신경회로망의 입력층에 적용된다. 은닉층 "j"에 net 입력은 다음과 같다.

$$net_j^h = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + \theta_j^h \quad (20)$$

여기에서 w_{ji} 는 i^{th} 입력으로부터 연결된 하중이다. $j=1, 2, \dots, N_h$ 에 대한 θ_j^h 는 은닉층 뉴런에 대한 문턱값을 나타낸다. 현재, 히든층에서 뉴런의 출력은 다음과 같다.

$$y_j^h = f \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + \theta_j^h \right) \quad (21)$$

그리고 출력층에서 뉴런에 net 입력은 다음과 같다.

$$net_k^o = \sum_{j=1}^{N_h} w_{kj} y_j^h + \theta_k^o \quad (22)$$

여기에서 θ_k^o 는 출력층에서 뉴런에 대한 문턱값을 나타낸다. 마지막으로 출력층에서 뉴런의 출력은 다음과 같다.

$$y_k^o = f \left(\sum_{j=1}^{N_h} w_{kj} y_j^h + \theta_k^o \right) \quad (23)$$

오차 함수는 다음과 같이 정의한다.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (24)$$

$$E = \sum_{p=1}^m E_p \quad (25)$$

최대 전력점 또는 최대 기계적 에너지 동작을 위한 신경회로망의 학습 블록 다이어그램은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

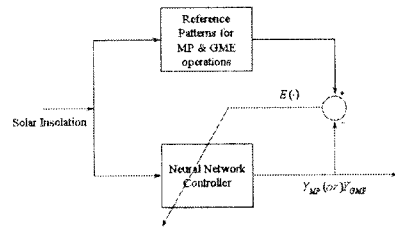


그림 5. 신경회로망 학습을 위한 구성도
Fig. 5 Block diagram for neural network training

5. 실험 및 결과

수학적 모델 기반 변환 듀티비는 위에서 언급한 두 개의 부하에 대하여 다양한 일사량에서 태양전지의 최대전력점 동작(MP)과 최대 기계적 에너지 출력 동작(GME)을 계산한다. 위 2가지 경우에 대하여 계산된 값은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

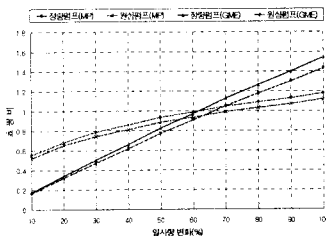


그림 6. 개선된 듀티비 특성
Fig. 6 Computed duty ratios characteristic

최대전력점 동작과 최대 기계적 에너지 출력 동작에 일치하는 듀티비는 다양한 태양광 일사량에 대하여 신경회로망 제어기로부터 얻을 수 있다. 그림 7과 8은 위의 그림 6에서 나타난 계산된 듀티비와 본 논문에서 제시한 신경회로망에 의한 듀티비를 최대 전력점동작 및 최대 기계적 에너지 동작의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 신경회로망에 의한 듀티비는 수학적 방법에 의해 계산된 듀티비에 양호하게 추종하고 있다. 이것은 신경회로망의 학습을 통한 듀티비의 추적값이 수학적 방법에 의해 계산된 값과 거의 일치하게 나타남을 알 수 있으며, 우수한 학습 성능을 나타내고 있다.

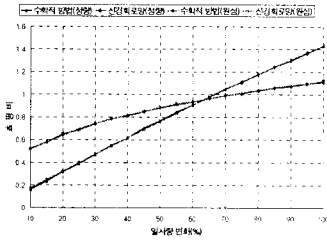


그림 7. MP 동작에 대한 듀티비 특성
Fig. 7 Duty ratios characteristic for MP operation

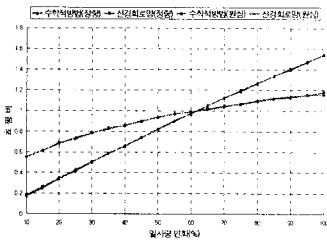


그림 8. GME 동작에 대한 듀티비 특성
Fig. 8 Duty ratios characteristic for GME operation

그림 9와 그림 10은 수학적 방법에 의한 듀티비와 신경회로망에 의한 듀티비의 퍼센트 오차를 나타내고 있다. 신경회로망에 의한 듀티비의 오차는 최대전력점 동작에서는 원심펌프 부하에서 1%, 정량펌프 부하에서 6%로 매우 양호하게 나타나고 있다. 마찬가지로 최대 기계적 에너지 동작점에서의 추적성능도 각 부하별 1%와 5%로 우수한 성능을 나타내고 있다.

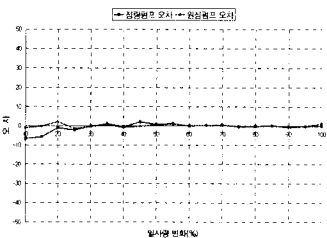


그림 9. MP 동작에 대한 신경회로망 제어기의 추적 오차
Fig. 9 Tracking error of neural network controller for MP operation

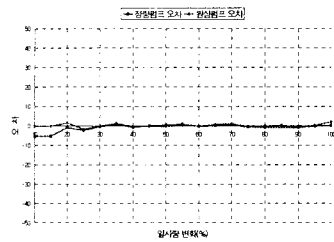


그림 10. GME 동작에 대한 신경회로망 제어기의 추적 오차
Fig. 10 Tracking error of neural network controller for GME operation

6. 결론

본 논문은 부하를 고려한 DC-DC 컨버터의 듀티비를 조절하여 PV 시스템의 최대전력점 추적을 제시한다. 신경회로망은 복잡한 시스템이나 비선형적인 시스템에 대하여 우수한 성능을 나타내는 제어기이다. 수학적 모델링을 통해 원심 및 정량펌프 부하에 대한 듀티비를 계산한 후에 신경회로망을 통해 추적된 값을 비교하여 그 오차가 정의된 범위내에 있을 때 최적의 듀티비를 출력한다.

본 논문에서는 다양한 일사량에 대하여 부하에 따른 최적의 운전점을 신경회로망에 의해 추적하였다. 일사량이 변화하여도 신경회로망을 통해 출력된 값은 수학적 모델링에 의해 계산된 값과 거의 유사하게 나타났고 그 오차는 1~6%내로 매우 양호한 추적성능을 나타냈으며 따라서 본 논문의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Zinger Z. and Braunstein A, "Optimum operation of a combined system of a solar cell array and a dc motor," IEE Trans, on PAS 100, 1193-1197, 1981
- [2] Appelbaum J, "Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators," IEE Trans, on Energy conversion 1, 17-24, 1986
- [3] Veerachary M, "Steady state and dynamic performance of PV supplied dc motors fed from intermediate power converters," Solar Energy Materials and Solar Cells 61, 365-381, 2000
- [4] Saied MM, "Matching of dc motors to photovoltaic generators for maximum daily gross mechanical energy," IEE Trans, on Energy Conversion 3, 1988
- [5] Narendra K.S. and Parthasarathy K, "Identification and control of dynamical systems using neural network", IEE Trans, on Neural Networks 1(1), 4-27, 1990