

태양광 발전시스템을 위한 신경회로망 PID 기반 MPPT 알고리즘

박지호*, 조현철, 김동완**

Neural PID Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Generator System

Jiho Park*, Hyuncheol Cho and Dongwan Kim**

Abstract

Performance of photovoltaic (PV) generator systems relies on its operating conditions. Maximum power extracted from PV generators depends strongly on solar irradiation, load impedance, and ambient temperature. A most maximum power point tracking (MPPT) algorithm is based on a perturb and observe method and an incremental conductance method. It is well known the latter is better in terms of dynamics and tracking characteristics under condition of rapidly changing solar irradiation. However, in case of digital implementation, the latter has some error for determining a maximum power point. This paper presents a PID based MPPT algorithm for such PV systems. We use neural network technique for determining PID parameters by online learning approach. And we construct a boost converter to regulate the output voltage from PV generator system. Computer simulation is carried out to evaluate the proposed MPPT method and we accomplish comparative study with a perturb and observe based MPPT method to prove its superiority.

Key words

Photovoltaic generator system(태양광 발전시스템), MPPT algorithm(최대전력점 추종알고리즘), PID control(비례미분적분제어), Neural network(신경회로망)

(접수일 2012. 7. 20, 수정일 2012. 8. 27, 게재확정일 2012. 8. 27)

* 한국전기연구원 전기추진연구본부 선임연구원 (Senior Researcher, Electric Propulsion Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute)

■ E-mail : dnipark@keri.re.kr ■ Tel : (051)803-3652

** 동명대학교 전기공학과 교수 (Professor, Department of Electrical Engineering in Tongmyong University)

■ E-mail : dongwan@tu.ac.kr ■ Tel : (051)629-1314 ■ Fax : (051)629-1309

Nomenclature

I_{ph} : photocurrent of the solar cells, A
 q : elementary charge, C
 r : Boltzmann constant
 R_s : series resistance, Ω

I_o : saturation current of the diode, A
 n : PN junction parameter
 T : PN junction temperature, $^{\circ}\text{C}$
 R_{sh} : parallel resistance, Ω

Subscript

PV : photovoltaic power generation
MPPT : maximum power point tracking
P&O : perturb & observe
IncCond : incremental conductance

1. 서론

우리나라의 경우 에너지 수입의 상당 부분을 원유에 의존하고 있어 국제 원유가 상승, 원유 수급의 불균형은 산업의 안정적인 지속 성장을 저해하고 있다. 또한, 2000년대 들어서 온실가스 감축의무를 부여한 교토의정서의 발효와 지구온난화로 인한 세계 선진국들의 환경 규제가 강화되고 있는 상황에서 에너지 절약에 대한 중요성은 한층 더 강조되고 있다. 따라서, 최근에 저탄소 녹색성장을 위한 그린에너지에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다⁽¹⁻⁷⁾.

이러한 그린에너지 중 태양광발전은 낮은 효율과 높은 발전단가라는 단점이 있으나, 가장 실용화에 가깝고 운전이 쉬우며, 유지 및 보수가 간단하고 발전규모의 선택이 자유롭다는 장점으로 인하여 최근 그 보급이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 태양전지의 출력은 외부 환경조건, 즉 일사량, 태양전지의 표면온도, 부하 등에 따라서 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선이 비선형적으로 변화되는 특성을 가지고 있다. 따라서, 주어진 외부조건에 대하여 태양전지가 항상 최대전력점(Maximum Power Point)에서 동작되도록 제어하기 위한 최대전력점 추종제어(MPPT)가 필수적이다.

최대전력점 추종제어를 위한 대표적인 알고리즘에는 전력비교법(P&O)과 증분 컨덕턴스법(IncCond)이 있다. 태양전지의 출력전압을 주기적으로 증가 또는 감소시키고 이전의 출력전력과 현재의 출력전력을 비교하여 최대전력점을 추종하는 전력비교법은 태양전지의 파라미터가 필요 없고, 알고리즘이 간단하며 디지털 방식에서의 구현이 용이하여 일사량이 서서히 변화는 상황에서는 최대전력점 추정 성능이 안정적인 장점이 있으나, 수렴속도가 느려 일사량이 급변할 경우 최대전력점 추종 성능이 저하되며, 최대전력점에서 출력전압이 연속적으로 미소 진동하여 출력전력의 손실을 가져오는 단점이 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 태양전지의 P-V 특성곡선 상에서 증분 컨

덕턴스와 순시 컨덕턴스를 비교하여 최대전력점을 추종하는 증분 컨덕턴스법은 일사량 급변시에도 일사량의 변화에 따른 추종성능이 우수하여 최대전력점에 도달시 출력전력이 안정적인 특성을 나타내는 장점이 있으나, 계산량이 많고 변환시간이 필요하기 때문에 빠른 연산시간이 요구되며 디지털 방식의 경우 컨덕턴스의 변화량에 일사량 변화가 영향을 미쳐 최대전력점 추종에 실패하는 단점이 있다^(11,12).

또한, 최근 퍼지이론이나 신경회로망 기술을 이용한 MPPT 알고리즘이 발표되고 있다. 이는 기존의 퍼지제어 및 신경회로망 기반 제어시스템을 MPPT 시스템에 적용한 것으로 시스템의 불확실성 및 환경의 변화에 적응적인 제어성능을 발휘할 수 있는 장점이 있다⁽¹³⁻¹⁷⁾. 그 외 이러한 기법들은 태양광 발전시스템의 모델링이나 파라미터 추정알고리즘을 개발하는데 중요한 기술로 적용되고 있다⁽¹⁸⁻²¹⁾. 하지만, 이러한 지능형 시스템을 PV 발전시스템에 바로 적용할 경우 신경망이나 퍼지시스템이 최적의 시스템 상태로 설계되지 않은 경우 PV 시스템 전체의 성능을 크게 저하시키는 요인이 될 수 있으며, 실시간에서 예상치 못한 환경적 및 시스템 요인 등으로 인해 급격한 시스템 성능의 저하에 불확실성의 요인으로 간주되고 있다.

지능형 알고리즘을 적용함에 있어 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문은 MPPT 제어시스템으로 기존의 PID 제어를 구성하며, 적응형 제어구조를 위하여 신경회로망 동조기를 구성한다. 다시 말해, 신경회로망은 시스템 오차를 입력으로 하여 PID 파라미터를 산출하며, PV 시스템의 환경적 변화와 시스템 섭동에 대하여 적응형의 형태로 최적의 제어파라미터를 추정한다. 본 논문에서 제안하는 MPPT 시스템의 성능의 타당성을 입증하기 위하여 PV 발전시스템에 승압형 컨버터를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 또한 성능의 우수성을 검증하기 위하여 기존의 P&O 기법을 함께 시뮬레이션을 실시하여 성능을 서로 비교 및 분석하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 태양전지 특성

광기전력 효과의 태양전지 등가회로는 Fig. 1과 같으며,

Fig. 1의 등가회로로부터 태양전지의 출력전류는 Figure과 같다.

$$I = I_{ph} - I_d - V_d / R_{sh} \quad (1)$$

$$V_d = V + R_s I \quad (2)$$

$$I_d = I_o \left\{ \exp\left(\frac{q V_d}{n k T}\right) - 1 \right\} \quad (3)$$

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left\{ \frac{q}{n k T} (V + R_s I) \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

Fig. 2와 3은 각각 태양전지의 I-V 특성곡선과 P-V 특성곡선을 나타낸다. Fig. 2의 I-V 특성곡선에서 일사량이 증가하면 출력전류가 증가하며, 온도가 상승하면 출력전압은 감소한다. 즉, 일사량과 온도의 변화에 따라서 태양전지의 특성

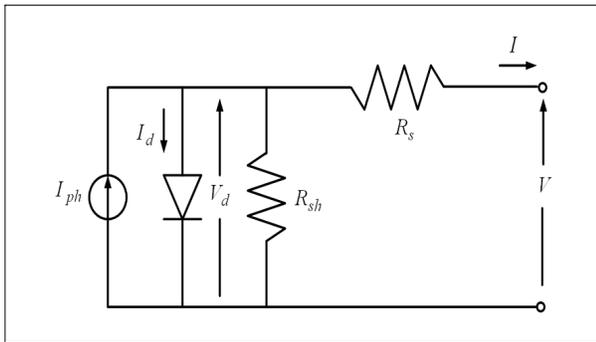


Fig. 1 Equivalent circuit of PV cell

곡선이 비선형적으로 변하게 되며, 이에 따라서 최대출력점도 비선형적으로 변하게 된다. 따라서, 주어진 외부조건에 대하여 태양전지가 항상 최대전력점에서 동작되도록 제어하기 위한 최대전력점 추종제어가 필수적이다⁽¹⁸⁾.

2.2 MPPT 시스템 모델링

본 논문에서 고려하는 MPPT 시스템은 부스트(boost) 컨버터 방식으로 Fig. 4와 같다. 여기서 스위칭 S는 PWM 신호를 나타낸다. 즉, 이 스위칭을 통해 PV 시스템의 최대전력점을 추종하게 된다.

Fig. 4의 수학적 모델은 S=0와 S=1일 경우로 각각 나타낼 수 있다. 즉, S=0일 경우의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\dot{i}_{L1} = \frac{1}{L} (V_{PV} - V_o) \quad (5)$$

$$\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_o}{R_L} \right)$$

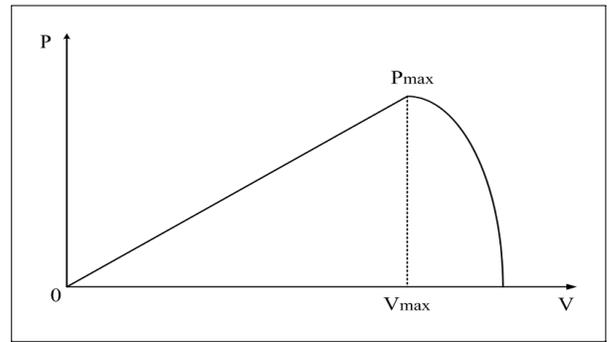


Fig. 3 P-V characteristic curve of PV cell

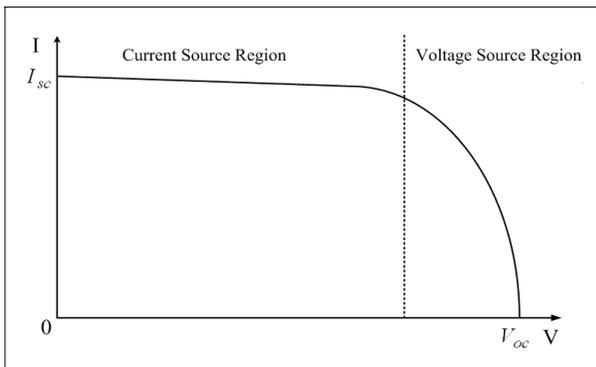


Fig. 2 I-V characteristic curve of PV cell

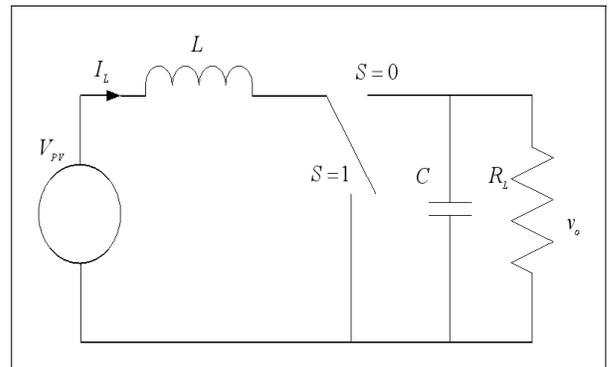


Fig. 4 MPPT system model

한편, $S=1$ 일 경우

$$\dot{i}_{L2} = \frac{1}{L} V_{PV} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{o2} = -\frac{1}{CR_L} V_o$$

와 같다. 식 (5)와 (6)은 다음의 중첩의 원리에 의해 한 개의 식으로 표현할 수 있으며

$$\dot{X} = (1-D)\dot{X}_1 + D\dot{X}_2 \quad (7)$$

여기서, $\dot{X}_1 = [i_{L1} \dot{V}_{o1}]^T$, $\dot{X}_2 = [i_{L2} \dot{V}_{o2}]^T$ 이며, $D \in [0, 1]$ 는 듀티(duty)비를 나타낸다. 따라서, 식 (5)와 (6)은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{i}_L = \frac{V_{PV}}{L} - \frac{V_o}{L} + D\frac{V_o}{L} \quad (8)$$

$$\dot{V}_o = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{CR_L} - D\frac{i_L}{C}$$

3. PID 기반 MPPT 제어시스템

3.1 이산 PID 제어

잘 알려진 이산 PID 제어규칙은 다음과 같다.

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) \right. \\ \left. + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (9)$$

여기서, K_p 는 제어기 파라미터, T 는 시정수, 그리고 T_i 와 T_d 는 적분 및 미분시간을 각각 나타낸다^(12,13). 제어입력 변수 u 의 범위는 $u \in [0,1]$ 이며 duty 비를 나타낸다. 식 (9)의 양변에 이전 제어변수 $u(k-1)$ 를 적용하여 정리하면

$$u(k) - u(k-1) = K_p \left\{ \left(\frac{1+T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) \right. \\ \left. + \left(-1 - \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) \right. \\ \left. + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (10)$$

과 같으며, 오차의 시간추이에 대하여 다시 나타내면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) \\ + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (11)$$

여기서, K_1 , K_2 , K_3 는 새로운 제어파라미터로서 다음과 같다.

$$K_1 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) \\ K_2 = K_p \left(-1 - \frac{2T_d}{T_i} \right) \\ K_3 = K_p \left(\frac{T_d}{T} \right) \quad (12)$$

본 논문의 MPPT 제어전략은 PV 시스템의 전력 P 와 전류 I 의 변화량의 비를 0으로 하는 것으로 수학적 표현은 $\partial P / \partial I = 0$ 와 같으며, 이산화식은 $\partial P / \partial I \approx [P(k) - P(k-1)] / [I(k) - I(k-1)] = 0$ 이다. 제어관점에서 볼 때 설정치는 0 이 되며, 따라서 제어오차 e 는 다음과 같다.

$$e = -\frac{P(k) - P(k-1)}{I(k) - I(k-1)} \\ = \frac{P(k-1) - P(k)}{I(k-1) - I(k)} \quad (13)$$

식 (13)을 식 (11)에 적용하면 MPPT를 위한 이산 PID 제어 규칙은 최종적으로 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) \\ + \sum_{i=1}^3 K_i \frac{P(k-i) - P(k-i-1)}{I(k-i) - I(k-i-1)} \quad (14)$$

3.2 신경회로망 파라미터 동조기

만족스러운 제어성능을 기대하기 위하여 식 (14)의 제어파라미터 K_i , $i=1,2,3$ 을 최적의 값을 설정하여야 한다. 일반적으로 PID 제어시스템은 선형 시스템이론을 이용하여 파라미터 값을 설정하지만 본 논문의 경우 식 (8)의 제어대상은 비선형 시스템이므로 다소 복잡한 알고리즘이 요구된다. 본 논문은 신경회로망 기법을 이용하여 제어파라미터를 설정한다⁽¹⁴⁾. 즉, 주어진 학습데이터를 이용하여 학습을 통해 PID 제어기 파라미터를 설정하며, 본 논문에서는 Fig. 5의 단층 퍼셉트론 구조의 신경회로망을 구성한다. 이 신경회로망 모델의 출력은 식 (14)의 PID제어파라미터 K_i 를 산출하게 되며, 수학적 표현은 다음과 같다.

$$K_i = \phi_i \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + w_{i,j+1} \right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

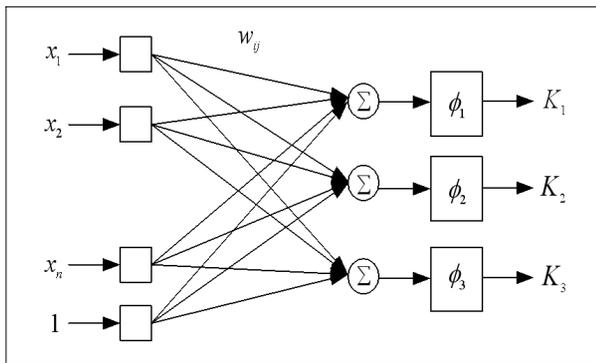


Fig. 5 A neural PID parameter tuner

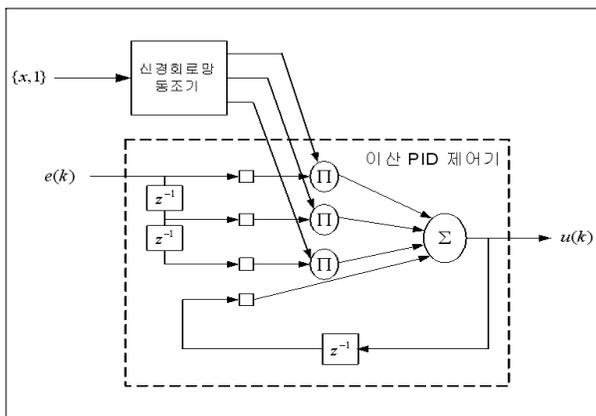


Fig. 6 The proposed neural based PID control

여기서, x 는 신경회로망 입력벡터, w 는 신경회로망 가중치를, 그리고 ϕ 는 비선형 활성화 함수를 나타낸다.

3.3 신경회로망 학습알고리즘

Fig. 5의 신경회로망 학습은 최적의 신경회로망 성능을 갖기 위하여 가중치 w 를 최적의 값으로 설정하는 과정을 의미한다. 신경회로망 학습을 위한 목적함수는 제어오차를 감소하기 위한 것으로 다음과 같이 정의한다⁽¹⁵⁾.

$$J = \min \left\{ \frac{1}{2} e^2 \right\} \quad (16)$$

본 논문은 최급 강하(Gradient descent) 최적화 알고리즘을 이용하여 신경회로망 학습알고리즘을 전개한다. 최급 강하 알고리즘은 정의된 평가함수에 대하여 최소값을 갖는 최적의 파라미터를 추정하는 확률론적(stochastic) 탐색기법 중의 하나이다. 본 논문의 신경회로망 학습은 식 (16)의 함수를 최소화하는 최적의 신경회로망 가중치를 탐색하는 것으로 다음의 미분형태로 정의된다.

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial J}{\partial w} \quad (17)$$

여기서, $\eta \in (0,1)$ 는 학습파라미터를 나타낸다. 한편, 식 (17)은 신경회로망 가중치의 수정규칙을 전개할 수 있으며 다음과 같다.

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \eta \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} \quad (18)$$

$$i = 1, \dots, n+1, \quad j = 1, 2, 3$$

여기서, 식 (18)의 편미분항은 연쇄법칙을 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있으며

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} &= \frac{\partial J}{\partial e} \times \frac{\partial e}{\partial P/\partial I} \\ &\times \frac{\partial P/\partial I}{\partial u} \times \frac{\partial u}{\partial k_i} \times \frac{\partial k_i}{\partial w_{ij}} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, 각 미분항은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial J}{\partial e} = e, \quad \frac{\partial J}{\partial P/\partial I} = -1,$$

$$\frac{\partial P/\partial I}{\partial u} \approx \frac{e}{u(k-1) - u(k)}, \quad \frac{\partial u}{\partial K_i} = e(k-i+1),$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial w_{ij}} = \begin{cases} \phi'(\cdot) x_j, & \text{if } i \in [1, n] \\ \phi'(\cdot), & \text{otherwise} \end{cases}$$

식 (19)의 결과식을 식 (18)에 대입하여 최종적으로 전개하면 다음과 같다.

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \eta e^2(k) \frac{e(k-i+1)}{u(k-1) - u(k)} \phi'(\cdot) x_j,$$

$$\text{if } i \in [1, n] \quad (20-1)$$

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \eta e^2(k) \frac{e(k-i+1)}{u(k-1) - u(k)},$$

$$\text{otherwise} \quad (20-2)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 MPPT 알고리즘의 타당성 및 성능의 우수성을 입증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템 환경 및 파라미터는 참고문헌 (16)에서 사용된 제원을 이용하였으며, 주요 파라미터 값은 Table 1과 같다.

시뮬레이션은 컨버터의 고정출력전압과 시변 전압에 대하여 각각 실시하였으며, 기존의 P&O 방식과 성능을 서로 비교 및 분석하였다. PV 시스템의 입력사항으로 일조량과 온도를 시변 변수로 두어 인가하였으며 이에 대하여 시변 출력전압이 발생한다. 제어목적은 이러한 PV 시스템의 출력이 일정하지 않더라도 컨버터의 출력은 설정치에 일정하도록 응답하는 것으로 한다. 시뮬레이션은 두 가지 경우의 시뮬레이션 시나리오를 설정하였으며, 첫 번째는 일정한 설정치에 대한 MPPT의 제어성능과 두 번째는 컨버터의 설정치가 동적으로 변화하는 경우 제어성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 각각 실시하였다.

Fig. 7은 컨버터의 출력전압을 20[V]로 고정한 경우 두 제어기에 대한 시스템응답을 각각 보여준다. 우선 P&O의 경우 약 28[V]의 최대 오버슈트가 과도응답에서 발생하며, 약 5초 부근에서 정상상태 응답으로 진입하는 것을 알 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 신경회로망 PID의 경우 과도응답에서 약 24[V]의 오버슈트가 발생하지만 약 1.8초에서 정상상태로 돌입하는 것을 알 수 있다. 이는 과도응답에서 제어성능이 월등하게 개선되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 이 두 제어시스템의 제어입력 파형을 각각 보여준다. 여기서 신경망 PID의 경우 보다 긴 샘플링 주파수를 갖는 제어입력을 산출하는 것을 알 수 있다. 두 파형에서 정상상태에서는 거의 0의 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 시스템 응답이 기준값에 도달하여 안정한 상태로 진입한 것을 의미한다.

Table 1. Parameter values of the PV system

파라미터	값
I_{rr}	$5.981 \times 10^{-8} (A)$
I_{scr}	$3.81 (A)$
T_r	$298 (K)$
K_i	0.0024
L	$1.5 (mH)$
k	0.001
q	$1.6 \times 10^{-19} (C)$
k_b	$1.38 \times 10^{-23} (J/K)$
Eg	$1.12 (V)$
n	1.2
C	$500 (\mu F)$

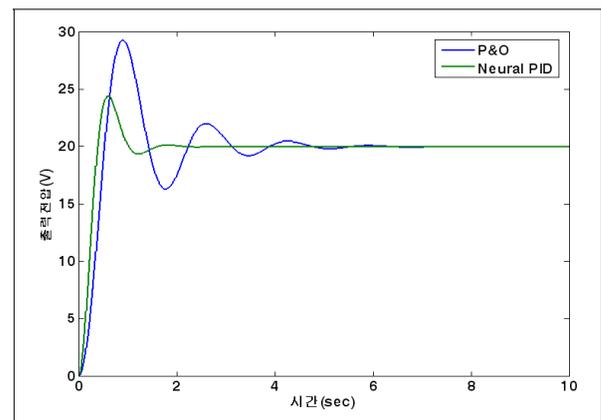


Fig. 7 System responses of the two control methods for fixed output voltage

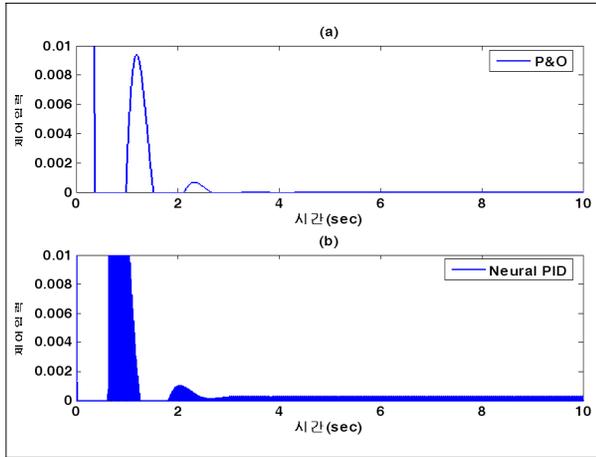


Fig. 8 Control input of the two control methods for fixed output voltage

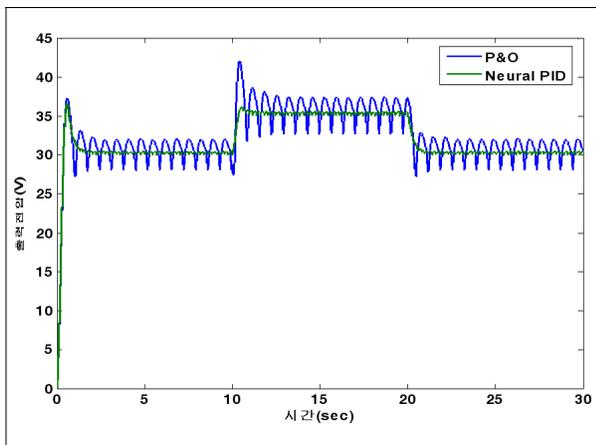


Fig. 9 System responses of the two control methods for time-varying output voltage

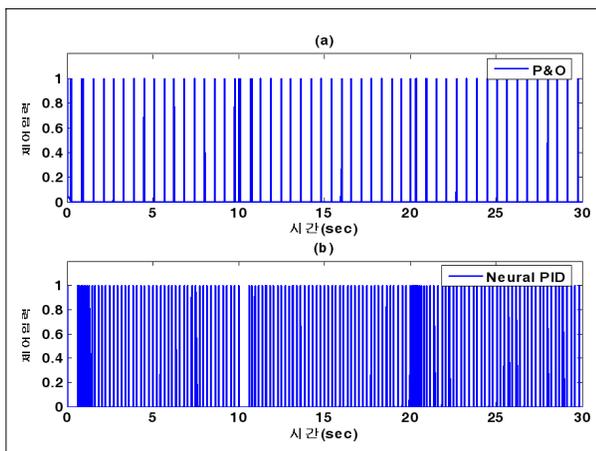


Fig. 10 Control input of the two control methods for time-varying output voltage

다음으로, Fig. 9는 본 논문에서 제안한 제어방식과 기존의 P&O 기법을 적용하였을 때의 컨버터의 출력특성을 각각 보여준다. 두 파형을 비교분석으로부터 기존의 P&O 방식은 정상상태에서 약 15% 정도의 오버슈트와 언더슈트를 주기적으로 발생하며 설정치에 도달하지 못하고 계속적으로 진동하는 것을 볼 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 제어방식의 경우 초기 제어시간에 오버슈트를 발생하지만 정상상태 응답에서는 거의 설정치에 가까운 값을 출력하며 설정치가 변화되는 구간인 10초와 20초에서도 거의 설정치에 도달하는 안정한 출력 특성을 보이고 있다. 따라서, 이 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문의 제어방식이 우수하다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 이 두 제어시스템에 대한 제어입력 파형을 각각 보여준다. 마찬가지로 신경망 PID의 경우 보다 짧은 샘플링 주기를 가진다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 PID 제어시스템을 이용한 태양광 발전시스템의 MPPT 알고리즘을 제안하였다. MPPT 제어시스템으로 기존의 PID 제어를 구성하며, 태양광 발전시스템은 비선형 및 불확실성이 강한 동적시스템이므로 PID의 파라미터를 선정하기 위하여 신경회로망 기술을 이용하였다. 제안된 시스템에서 신경회로망은 시스템 오차를 입력으로 하여 PID 파라미터를 산출하며, PV 시스템의 환경적 변화와 시스템 섭동에 대하여 적응형의 형태로 최적의 제어파라미터를 추정한다. 본 논문에서 제안하는 MPPT 시스템의 성능의 타당성을 입증하기 위하여 PV 발전시스템을 승압 초퍼회로에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존의 P&O 알고리즘과 비교 검토하여 성능의 타당성 및 우수성을 입증하였다. 향후 연구로서 실시간 태양광 시뮬레이터를 이용하여 실적용 가능성을 검증하고자 한다.

References

- [1] 김동완, 박성원, 2010, “에너지저장을 위한 태양광발전설비 연계형 경관조명 전력제어시스템의 개발”, Trans. KIEE. Vol. 59P, No. 4.

- [2] 김의환, 강승원, 김재언, 2011, “태양광발전시스템의 장기운전에 의한 성능특성 분석”, 한국신재생에너지학회지, Vol. 7, No. 2, pp. 28–35.
- [3] 박지호, 조현철, 2008, “시변 파라미터 특성을 갖는 유연한 로봇 액추에이터의 적응제어”, 전기학회논문지, Vol. 57P, No. 3, pp. 250–254.
- [4] 신춘식, 안영주, 김동완, 2009, “플라이백 컨버터방법에 의한 태양광발전설비의 납축전지 스위칭모드 전환형 펄스충전기 개발”, Trans. KIEE. Vol. 58P, No. 1, pp. 20–26.
- [5] 이성훈, 이기욱, 최주엽, 송승호, 최익, 2008, “태양광용 부스트 컨버터의 디지털 전압모드 제어기기 설계”, 한국신재생에너지학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp. 94–97.
- [6] 조현철, 심광열, 2010, “태양광 발전 시스템을 위한 유비쿼터스 네트워크 기반 지능형 모니터링 및 고장진단 기술”, 대한전기학회 논문지, Vol. 59, No. 9, pp. 1673–1679.
- [7] 차경호, 김정택, 2011, “부유식 태양광-파력 복합발전개념 및 원자력발전소 비상전원을 위한 응용”, 한국신재생에너지학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 37–41.
- [8] 황창선, 김문수, 김동완, 심재식, 이경홍, 1994, “신경회로망과 GMDH기법을 이용한 고조파전류의 예측에 관한 연구”, Trans. KIEE. Vol. 43, No. 7, pp. 1178–1185.
- [9] A. Bahgat, N. Helwab, G. Ahmad, E. Shenawy, 2005, “Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks”, Renew. Energy, Vol. 30, pp. 1257–1268.
- [10] A. Hussein, K. Hirasawa, J. Hu, 2004, “A robust control method for a PV supplied DC motor using universal learning networks”, Sol Energy, Vol. 76, pp. 771–780.
- [11] A. Theodore, F. Ocran, C. Junyi, C. Binggang, S. Xinghua, 2005, “Artificial neural network maximum power point tracker for solar electric vehicle”, Singhua Sci Technol, Vol. 10, pp. 204–208.
- [12] C. Hua, and J. Lin, 2003, “An On-line MPPT Algorithm for Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays”, Renew. Energy 28, pp. 1129–1142.
- [13] D. W. Kim, S. W. Park. and H. S. Kim, 2011, “Development of Intelligent Landscape Lighting Power Control and Monitoring System with Solar Cell Generator Equipment”, Trans. KIEE. Vol. 60P, No. 2.
- [14] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, and G. S. Kim, 2004, “A Novel Two-mode MPPT Control Algorithm based on Comparative Study of Existing Algorithms”, Sol. Energ, Vol. 76, No. 4, pp. 455–463.
- [15] H. C. Cho, S. B. Yoo, and K. S. Lee, 2009, “Nonlinear Adaptive Control and Stability Analysis for Improving Transient Response of Photovoltaic Converter Systems”, Journal of institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 15, No. 12.
- [16] I. Altas, A. Sharaf, 2008, “A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems”, Renew. Energy, Vol. 33, No. 3, pp. 388–399.
- [17] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, 2005, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, No. 4, pp. 963–973.
- [18] N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepreechacharn, Y. Sriuthaisiriwong, 2005, “Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system”, Renew. Energy, Vol. 30, pp. 1771–1788.
- [19] T. Eram, and P. L. Chapman, 2007, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 22, No. 2, pp. 439–449.
- [20] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, 2006, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 90, pp. 1555–1578.
- [21] Y. C. Kuo, T. J. Liang, and J. F. Chen, 2001, “Novel Maximum-power-point Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 48, No. 3, pp. 594–601.

박 지 호



1997년 동아대학교 전기공학과 공학사
1999년 동아대학교 전기공학과 공학석사
2002년 동아대학교 전기공학과 공학박사

현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 선임연구원
(E-mail : dnipark@keri.re.kr)

조 현 철



1997년 부경대학교 제어계측공학과 공학사
1999년 동아대학교 전기공학과 공학석사
2006년 미국 네바다 주립대학교 전기공학과 공학박사

현재 울산과학기술대학교 전기전자학부 조교수
(E-mail : hcjo@uc.ac.kr)

김 동 완



1984년 동아대학교 전기공학과 공학사
1987년 부산대학교 전기공학과 공학석사
1995년 부산대학교 전기공학과 공학박사

현재 동명대학교 전기공학과 교수
(E-mail : dongwan@tu.ac.kr)