

RCGA에 기초한 태양전지 모델의 파라미터 추정

권봉재[†] · 신명호* · 손영득** · 진강규***

(원고접수일 : 2003년 4월 21일, 심사완료일 : 2003년 5월 22일)

RCGA-Based Parameter Estimation of Solar Cell Models

Bong-Jae Kwon[†] · Myung-Ho Shin* · Yung-Deug Son** · Gang-Gyoo Jin***

Key words : Solar cell(태양전지), PV power generation(태양광발전), 파라미터 추정(parameter estimation), RCGA(실수코딩 유전알고리즘)

Abstract

A photovoltaic power generation system is an infinite and clean energy system. Recently, because of the realization of high efficiency and low cost PV modules, the studies on the PV system have extensively increased. In this paper, we present an online scheme for parameter estimation of solar cell, based on the model adjustment technique and a real-coded genetic algorithm(RCGA). The ideal diode model and the diode model with series and shunt resistors are used to estimate their parameters. Simulation works using field data in the form of a V-I characteristic curve are carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

지구환경 문제가 국제사회의 새로운 쟁점으로 부각되고 있고, 부존자원의 고갈에 대한 경각심이 높아짐에 따라 태양광, 풍력과 같은 대체에너지 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 태양 에너지를 직접 전기로 변환하는 태양광 발전시스템은 아직도 초기 설치비가 비싼 것이 단점이지만 친환경적이고, 무제한적으로 에너지를 얻을 수 있

으며, 유지보수가 용이해 범국가적인 차원에서 도서지방을 기점으로 서서히 보급되고 있다. 그러나 태양전지의 출력 전력은 일사량, 표면온도 등과 같은 외부환경에 민감하게 응답하며, 동일한 조건에서도 전압과 전류의 동작점에 따라 그 크기가 달라진다.

따라서 기상 변화에 따른 태양광 발전시스템의 발전량을 예측하거나, 변환효율을 극대화하기 위해 최대출력점(Maximum power point: MPP)

[†] 책임저자(한국해양대학교 대학원 제어계측공학과), E-mail:kwon2000@dreamwiz.com, T:051)410-4924

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

** 현대중공업 선박해양연구소

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

추적 제어기법을 개발하고 그 성능을 비교분석하기 위해서는 동일한 조건에서 반복적으로 실험을 실시할 수 있는 환경이 요구된다⁽³⁻⁵⁾. 실제 환경에서는 기상조건과 부하조건 불확실성 때문에 실험환경을 정확하게 반복하는 것이 용이하지 않다. 그러나 태양전지의 모델과 그 매개변수 값을 정확히 알 수 있다면 가상의 태양광 발전시스템 구현을 통해 동일한 조건에서 반복적 실험이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 중대규모 태양광 발전시스템의 가상 구현, 출력 전력과 연계장치 규모의 예측을 위한 태양전지 50(W)급의 모델들의 파라미터를 추정하는 한 방법을 제시한다. 여기서 발생하는 최적화 문제는 유전알고리즘(Genetic algorithm: GA)를 이용하고 비선형방정식의 해법에는 Ridder법⁽⁸⁾을 이용한다. 전압-전류 실험 데이터로부터 태양전지의 모델(이상적인 다이오드 모델, 직병렬 저항 특성을 고려한 다이오드 모델)의 특성과 파라미터의 추종을 통하여 제안한 방법의 유효성을 밝힌다.

2. 태양전지의 특성

2.1 태양전지의 모델

태양광(PV) 발전은 빛의 광기전력 효과를 이용한 것으로서, 기전력을 일으키는 태양전지(Solar cell)의 출력 특성은 기상변화(일사량, 온도)와 부하조건 등에 따라 달라지게 되므로, 태양전지 어레이 외에 안정된 전기공급을 위한 인버터와 전력저장용 축전지 등의 주변장치로 구성된다. Fig. 1은 독립형 태양광 발전시스템의 구조를 나타낸 것이다.

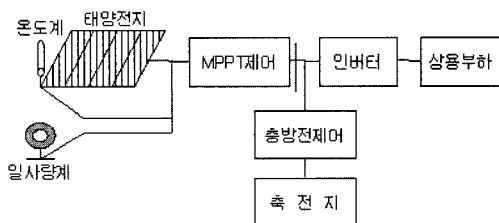


Fig. 1 PV power generation system

태양광 발전시스템의 핵심이 되는 태양전지는 다이오드와 같이 p형의 반도체와 n형의 반도체의 접합형태를 가지는 소자로서 몇 가지 형태로 모델링할 수 있다^(1,2). 그 중 하나가 Fig. 2와 같이 이상적인 다이오드 특성을 지니는 등가회로로 나타낸 것이다. 여기서 태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{PH} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있고, 이 때 전압전류 특성방정식은 식 (1)과 같이 표시된다.

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - N_P I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkTN_S}\right) - 1 \right] \quad (1a)$$

$$I_{PH} \cong I_{SC} \cdot S \quad (1b)$$

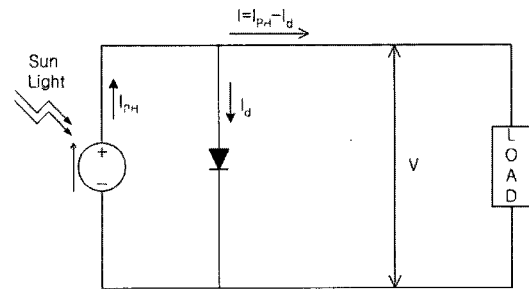


Fig. 2 Equivalent circuit using ideal diode model for solar cell

그러나 실제로는 이상적인 다이오드를 제작하는 것은 불가능하기 때문에 접촉저항 및 표면층의 시트저항 등을 나타내는 직렬저항 R_s 와 누설전류에 기인한 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다. Fig. 3은 직병렬 저항 특성을 고려한 실제의 태양전지의 등가회로를, 식 (2)는 특성방정식을 보여주고 있다.

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkTN_S}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2a)$$

$$I_{PH} = I_{SC} \cdot S + I_T(T - T_R) \quad (2b)$$

$$I_0 = I_{OR} \left(\frac{T}{T_R} \right)^3 \exp\left[\frac{qE_G}{k} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2c)$$

- V: 출력 전압[V] I: 출력 전류[A]
- T: PV 표면 온도[°C] I_{PH}: 광기전력[A]
- I₀: 역포화 전류[A]
- N_P, N_S: 직병렬 연결 셀의 개수
- n: 다이오드 성능지수 k: 볼츠만 상수[J/K]
- T_R: 동작기준 온도[°C]
- R_S, R_{Sh}: 직병렬 저항[Ω]
- I_{SC}: 단락전류[A] S: 기준 일사량[kW/m²]
- q: 전자의 전하량[C] E_G: 에너지 갭[eV]
- I_T: 표면온도 상승시(1°K) 단락전류 변화량[A]
- I_{OR}: 동작기준 온도의 역포화 전류[A]

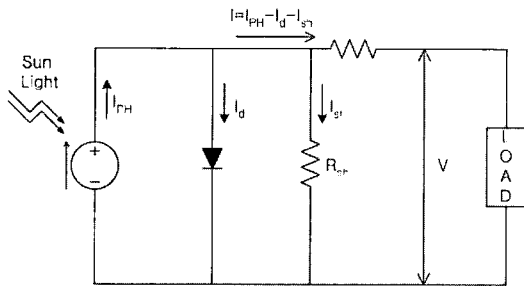


Fig. 3 Equivalent circuit including series and shunt resistor for solar cell

2.2 태양전지의 출력특성

태양전지의 특성을 결정하는데 있어 중요한 파라미터로는 내부적으로 직렬저항(R_s), 병렬저항(R_{sh}) 그리고 다이오드의 역포화 전류(I₀)가 있고, 외부적으로는 일사량과 온도변화 등이 있다. 직렬 저항은 태양전지의 광전류를 방해하는 요소로서 여기에는 표면 및 기판 저항, 전극 접촉저항, 전극 자체의 고유저항 등이 결합되어 있고, 고일사량, 고온도의 경우에 미치는 영향은 더 크다. 직렬 저항이 증가함으로 인해 단락전류(I_{sc}), 곡선의 기울기는 감소하지만, 개방전압(V_{oc})에는 영향을 주지 않는다. 또한 병렬저항(또는 누설저항)은 태양전지 내부의 누설에 의한 것으로 저항값이 감소함에 따라 개방전압, 곡선의 기울기도 감소하지만 단락전류에는 영향을 주지 않는다.

외부적인 요소로서 일사량과 온도변화는 태양전지의 출력 전류와 전압에 영향을 주는데, 출력전류는 대개 일사량에 비례하여 결정되고 온도변화

에 대해서는 거의 영향을 받지 않으며, 전압은 일사량 변화에 거의 영향을 받지 않지만 온도변화에 대해서는 전압과 반비례하는 성질을 가지고 있다.

Fig. 4는 태양전지 50(W)급의 V-I 실험 데이터 및 발전전력 특성곡선을 나타낸 것으로서, 그림에서 MPP는 최대 출력점을 의미한다.

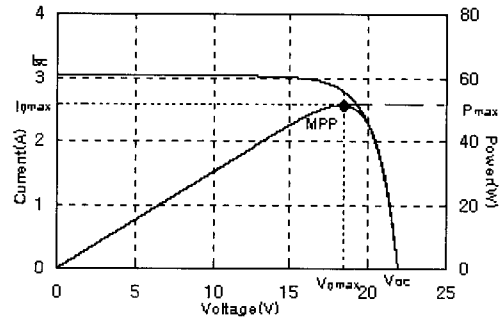


Fig. 4 V-I characteristics and output power curves of solar cell

3. 태양전지 파라미터 추정

기상 변화에 따른 태양광 발전시스템의 발전량을 예측하거나, MPP 추적 제어기법을 개발하고 그 성능을 비교분석하기 위해서는 태양전지의 정확한 모델이 필요하다. 이 절에서는 GA와 Ridder법을 통하여 태양전지의 매개변수를 온라인 추종하는 문제를 다룬다.

3.1 최적화 도구로서의 GA

GA는 유전학과 진화원리를 컴퓨터 알고리즘과 접목시켜 매우 복잡한 최적화 문제를 다룰 수 있는 메커니즘을 제공함으로써 지난 10년간 신호처리, 시스템 식별 및 제어, 신경회로망의 설계 및 학습, VLSI 설계, TSP 및 작업 스케줄링 등 여러 분야에 응용되어 왔다^[6]. GA의 탐색 프로세스는 크게 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이 5단계로 구분된다. 초기화 단계에서는 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들의 집단이 형성된다. 다음 단계에서 개체들은 복호화되어 목적함수를 제공하고 이로부터 적합도가 계산된다. 개체들의 상대적인 적합도 값에 따라 현재 집단

내의 개체들이 재생산을 위해 선택된다. 일반적으로 성능이 좋은 개체들은 더 많이 선택되고 성능이 나쁜 개체들은 집단으로부터 소멸된다. 선택된 개체들은 교배를 통해 서로 간에 유전정보를 교환함으로써 집단에 새로운 개체를 도입하게 된다. 마지막으로 돌연변이를 통해 개체의 유전정보를 임의로 변경하여 집단에 새로운 정보를 도입한다. 이렇게 해서 새롭게 형성된 집단은 최적의 해가 발견될 때까지 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 반복하게 된다. GA를 적용할 때 동조할 파라미터는 부호공간상의 자연 파라미터로 변환된다. 이를 위해 이진코딩이 폭넓게 채용되어 왔으나 최근에는 정밀도 개선, 연산시간의 단축 등의 관점에서 실수코딩을 이용하는 경향이 있어 본 논문에서는 엘리트 전략과 스케일링 윈도우법을 결합한 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)을 이용한다⁽⁶⁾. 실수코딩을 채용함으로써 탐색될 파라미터가 I_{OR} , R_s , R_{sh} 라면 염색체는 $\mathbf{s} = (I_{OR} R_s R_{sh})$ 로 표현된다.

3.2 RCGA를 이용한 파라미터 추정

조정할 모델이 확정되고 실험장치로부터 측정 데이터를 얻게되면 다음은 파라미터를 추정하는 작업이 요구된다⁽⁷⁾. Fig. 5는 파라미터를 얻기 위한 블록선도를 보여준다.

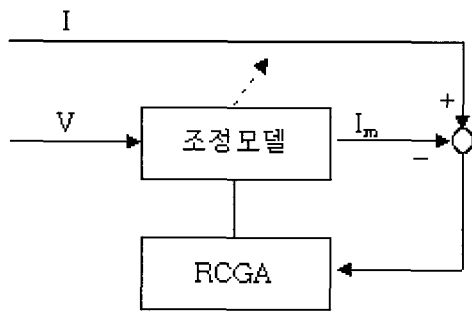


Fig. 5 Parameter estimation

여기서 RCGA는 측정 신호와 모델 출력 간의 오차가 최소가 되도록 모델의 파라미터를 연속적으로 조정하게 된다. 이때 RCGA는 개체의 성능이 좋고 나쁨을 정량적으로 평가하도록 적합도 함수

를 필요로 하는데, 적합도는 다음 절대오차적분 (IAE)의 목적함수로부터 계산되어 진다.

$$J(\boldsymbol{\varphi}) = \sum_{j=k-W+1}^k |I(j) - I_m(j)| \quad (3)$$

여기서 I와 I_m 는 각각 측정 전류와 모델의 전류, $\boldsymbol{\varphi} \in R^n$ 는 조정되는 파라미터 벡터, n은 파라미터 수이고, W는 데이터 윈도우의 크기이다. W의 크기는 모델의 정확도와 연산시간 사이에서 적절히 타협되는 매개변수이다.

한편 최소화 문제를 최대화 문제로 전환해주도록 다음 적합도 함수가 사용된다.

$$f(\mathbf{s}) = -J(\boldsymbol{\varphi}) + \delta \quad (4)$$

여기서 δ 는 전 세대 동안 $f(\mathbf{s}) \geq 0$ 의 관계가 만족되도록 선택되는 상수로서, 집단내에 선택압이 적절히 유지되도록 변경된다⁽⁶⁾.

3.3 비선형 V-I 방정식의 해법

직병렬 저항을 고려한 태양전지 모델로부터 특정 전압에 대응되는 전류를 구하기 위해서는 식 (2)로 표시되는 비선형방정식 $f(I) = 0$ 의 해를 푸는 문제가 발생된다. 여기에는 반분법, 할선법, 정반(Regular-falsi)법 등을 적용할 수 있지만, 수렴성이 항상 보장되는 Ridder법을 이용한다⁽⁸⁾. 이 방법은 근이 존재하는 폐구간 $[I_1, I_2]$ 이 주어지면, 아래와 같은 절차로 새로운 점을 찾는다.

RIDDER ALGORITHM

- 단계1: $k = 0$;
- WHILE< 정지조건이 만족되지 않을 때
 단계 2-5를 반복 >
- 단계2: 중간값 $I_3 = (I_1 + I_2)/2$ 를 구한다;
- 단계3: Residual 함수를 직선으로 변환 해주는 e^Q 를 방정식 $f(I_1) - 2f(I_3)e^Q + f(I_2)e^{2Q} = 0$ 으로부터 구한다. 즉,

$$e^Q = \frac{f(I_3) + \text{sign}[f(I_2)]\sqrt{f^2(I_3) - f(I_1)f(I_2)}}{f(I_2)} \quad (5)$$
 를 구한다;

단계4: $f(I_1)$, $f(I_3)e^q$, $f(I_2)e^{2q}$ 에 대해 정반법을 적용하고 다음 식을 통해 새로운 점을 찾는다:

$$I_4 = I_3 + (I_3 - I_1) \frac{\text{sign}[f(I_1) - f(I_2)]f(I_3)}{\sqrt{f^2(I_3) - f(I_1)f(I_2)}} \quad (6)$$

단계5: $k = k + 1$;

END WHILE

4. 실험 및 모델해석

모델 조정기법과 RCGA를 이용하여 태양전지 모델의 파라미터를 추정하는 본 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. RCGA의 매개변수로는 집단크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta_i = 1.7 (1 \leq i \leq N)$, 교배 확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.05$, 스케일링 윈도우 $W_s = 1$ 을 선택하였다^[6]. 파라미터 추정에 사용된 전압과 전류 신호로는 Fig. 4와 같은 실제 태양전지로부터의 측정된 V-I 특성곡선을 사용하였다.

일반적으로 GA로부터 얻어지는 추정치의 정도는 초기집단의 선택에 크게 좌우될 수 있으므로 이를 배제하기 위하여 독립된 씨드로 10회 실험을 행하고, 여기서 얻은 결과를 평균하여 추정치로 하였다.

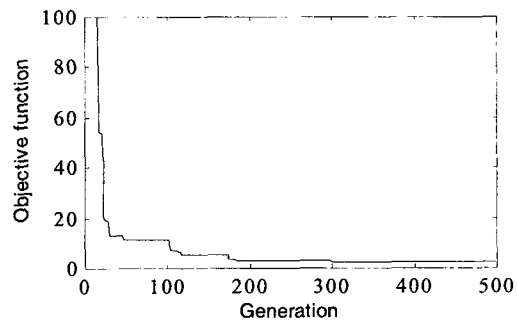
4.1 이상적인 모델

먼저 이상적인 다이오드 모델의 파라미터를 추정하는 문제를 고려하였다. 조정모델은 식 (1)과 같고 이 문제에서 파라미터 값으로 $N_s = 36$, $N_p = 1$, $k = 1.3810 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$, $q = 1.60210 \times 10^{-19} [\text{C}]$, $T = 25 [^\circ\text{C}]$, $S = 1 [\text{kW/m}^2]$ 을 사용하였고, I_{sc} , I_o , n 을 추정하기로 한다. 탐색구간은 $0 \leq I_{sc}, n \leq 5$, $0 \leq I_o \leq 3 \times 10^{-6}$ 으로 설정하였다. 10회의 모의실험을 실시하고 추정치의 평균과 표준편차를 구한 결과는 Table 1에 나타내었다.

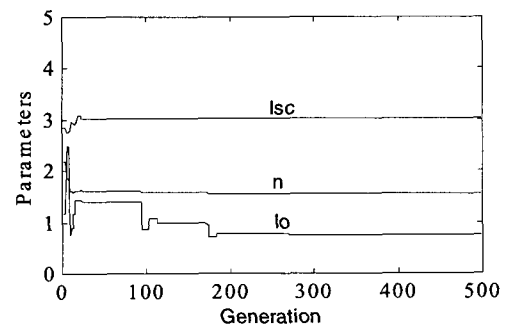
Fig. 6은 RCGA가 최적 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 목적함수가 수렴해 가는 정도를 나타내며 Fig. 6(b)는 파라미터 I_{sc} , n , I_o 를 나타낸 것이다.

Table 1. Estimated parameters of the ideal diode model

Parameter	Value
	mean \pm deviation
I_{sc}	3.02999 ± 0.001
I_o	$(0.73899 \pm 0.01) \times 10^{-6}$
n	1.49338 ± 0.001



(a)



(b)

Fig. 6 Estimation process

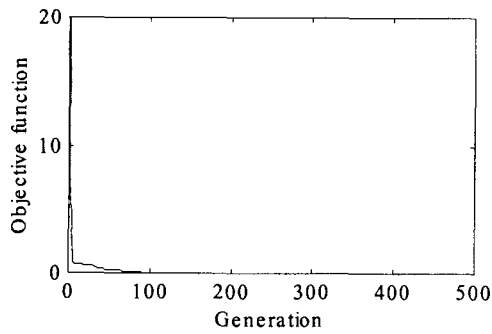
4.2 직병렬 저항 특성을 고려한 모델

다음은 직병렬 저항 특성을 고려한 모델의 파라미터를 추정하는 문제를 다루었다. 조정모델은 식 (2)와 같고 이 문제에서는 $I_{sc} = 3.03 [\text{A}]$, $n = 1.5$, $T_R = 300 [^\circ\text{K}]$, $S = 1.0 [\text{kW/m}^2]$, $E_G = 1.103 [\text{eV}]$ 로 하였고 I_{OR} , R_s , R_{sh} 를 추정한다. 탐색구간은 $0 \leq I_{OR} \leq 1.5 \times 10^{-6}$, $0.01 \leq R_s \leq 0.05$, $500 \leq R_{sh} \leq 1500$ 으로 설정하였다. 10회의 실험을 실시하고 추정치의 평균과 표준편차를 구한 결과는 Table 2와 같다.

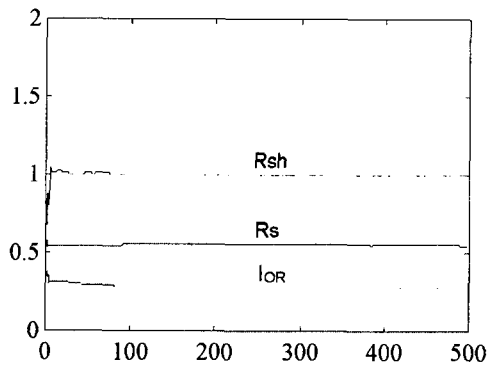
Table 2. Estimated parameters of the diode model with series and shunt resistors

Parameter	Value
	mean \pm deviation
I_{OR}	$(0.5475 \pm 0.005) \times 10^{-6}$
R_s	$(0.2799 \pm 0.001) \times 10^{-1}$
R_{sh}	$(1.0012 \pm 0.005) \times 10^3$

Fig. 7은 RCGA가 최적 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 목적함수가 수렴해 가는 정도를 나타내며 Fig. 7(b)는 파라미터 R_{sh} , R_s , I_{OR} 를 나타낸 것이다.



(a)



(b)

Fig. 7 Estimation process

4.3 모델의 검증

추정된 두 모델은 추정에 사용된 측정 데이터를

가지고 검증되었다. 측정 데이터와 모델과의 차이를 분명하게 보여주기 위하여 측정 데이터와 두 모델과의 차이를 그림에 나타내었다. Fig. 8에서 보면 이상적인 다이오드 모델에서는 약간의 오차가 발생하였고, 직병렬 저항을 고려한 모델은 오차가 거의 없었다.

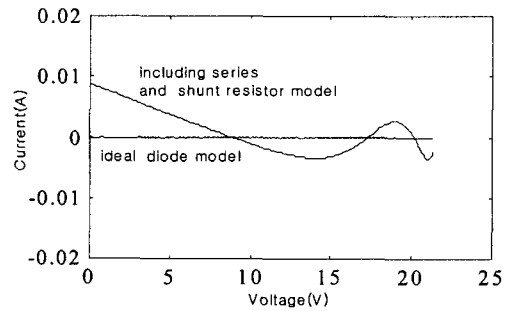


Fig. 8 Differences between the measurement and the estimated models

4.4 모델의 해석

제안한 방법으로 얻어진 직병렬 저항 특성을 고려한 모델의 출력 특성곡선을 나타내었다. Fig. 9는 일사량 $S = 1 [kW/m^2]$ 으로 유지하면서 온도 $T = 0 \sim 100 [^{\circ}C]$ 사이에서 변경하면서 그린 것이고, Fig. 10은 $T = 25 [^{\circ}C]$ 로 고정하고 일사량 $S = 0 \sim 1 [kW/m^2]$ 사이에서 변경하면서 그린 것이다.

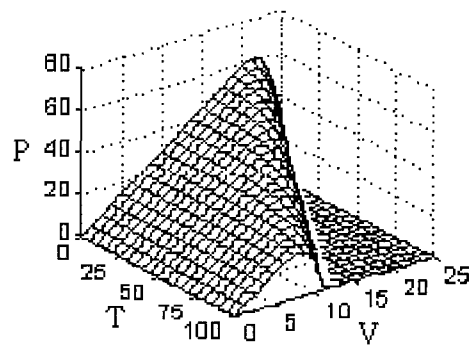


Fig. 9 Power characteristic curve of solar cell to surface temperature changes

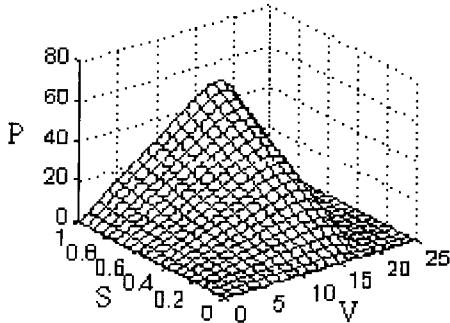


Fig. 10 Power characteristic curve of solar cell to insolation changes

그림에서 보면 출력전력은 기상조건과 전압의 함수가 되어 이들의 변화에 민감하며, 동일한 기상조건 하에서 최대 전력을 얻기 위해서는 전압변경을 통해 MPP 추적제어가 필요함을 알 수 있다. 만약 실험장치로부터 실측된 일사량과 온도 데이터를 모델식에 결합한다면 MPP 추적제어 알고리즘의 성능을 평가할 수 있는 태양광 발전 환경 구현이 가능하다. 또한 기상조건에 따른 출력 특성곡선을 활용함으로써 가상 상용 발전시스템 구현 시 모듈의 직병렬 수의 결정, 발전량의 추정 등이 가능하다.

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전시스템의 가상 구현을 위해 50W급의 태양전지의 특성을 분석하고, RCGA와 모델을 기반으로 태양전지의 파라미터를 추정하였고, 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다. 이를 통해 기상 조건에 의한 대규모 태양전지 출력의 가상 구현을 할 수 있고, MPPT 제어 알고리즘을 개발하고 그 성능을 평가할 수 있는 태양광 발전 환경 구현이 가능하다. 향후 연구과제로는 실시간으로 변하는 V-I 신호를 이용하여 온라인 적으로 파라미터를 추정할 수 있는 알고리즘의 개발과 실험이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] R. Messenger and J. Ventre,

Photovoltaic System Engineering, CRC Presss, 2000

[2] M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Presss, 1999

[3] Min-Won Park and In-Keun Yu, "Photovoltaic Generation System Simulation Using Real Field Weather Conditions", Journal of IKEE, Vol. 5, No. 2, pp. 121-127, 2001

[4] 박민원, 김봉태, "EMTDC를 이용한 태양전지의 새로운 시뮬레이션 모델", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, A편, pp. 113-115, 2000

[5] 한정만, "50W급 태양전지의 가상 구현을 위한 모듈의 직 병렬 연결 특성 해석 및 제어", 전력 전자학회 하계부문 학술대회 논문집, pp. 53-57, 2002

[6] 진강규, 유전알피즘과 그 응용, 교우사, 2000

[7] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 비선형 시스템의 온라인퍼지 모델링", 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 8, No. 3, pp. 87-87, 1998

[8] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1992

저 자 소 개



권봉재 (權峯載)

1976년 6월생, 2002년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 현재 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중



신명호 (辛命浩)

1974년 7월생, 2002년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 현재 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중



손영득 (孫榮得)

1971년 12월생, 1997년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1998 동경공업대학 연구원, 2001년 고베상선대학 졸업(석사), 현재 (주)현대중공업 선박 해양연구소



진강규 (陳康奎)

1953년 10월생, 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사), 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과 (박사), 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 정교수