

공액구배법을 이용한 태양광 발전 패널 모의 장치용 엔진 개발

서영태, 박준영, 최성진
울산대학교 전기공학부

PV Model-based Solar Array Simulator with Conjugate Gradient Method

Young-Tae Seo, Jun-Young Park, Sung-Jin Choi
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

태양광 패널 등가모델을 결합한 태양광 발전 패널 모의 장치(SAS)는 정확도 면에서 많은 장점이 있다. 특히 SAS에서 사용되는 등가회로 모델은 주변 환경에 맞게 빠르게 변하는 I-V 출력특성을 추출할 수 있어야 하며, 추출시간이 짧을수록 좋다. 본 논문은 태양광 등가회로 모델의 파라미터를 빠르게 추출하여 I-V 특성곡선을 모사할 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 모델은 실시간으로 변화하는 태양광 패널의 출력 특성을 빠르게 모사하기 위해 미분을 사용해서 등가회로의 파라미터를 추출한다. 제안 모델의 타당성 검증은 기존의 사용하는 방법들과의 비교를 통해 진행하였고, 그 결과 정확도는 기존의 사용하는 방법과 비슷하게 유지하면서 속도는 향상됨을 확인할 수 있었다.

1. 서론

실제 태양광 패널을 이용해서 전체 시스템을 검증하기 전에 시스템의 개발단계에서는 그림1의 Solar Array Simulator(SAS)를 많이 이용하게 된다. 그 이유는 PV패널의 I-V특성은 패널이 구동되는 온도나 일사량에 따라 실시간으로 변하므로 실제로 사용하기에는 제약이 많기 때문이다. 본 논문에서 PV 등가회로 모델을 이용하여 SAS를 구성한다. PV모델로는 그림2의 Single-diode 모델을 사용하고 이 모델을 통해 SAS의 제어 지령치를 생성됨에 따라 내부 파라미터 R_s , G_{sh} , A , I_{ph} , I_o 를 온도와 일사량에 따라서 계속 변화시켜줄 필요가 있다.

본 논문에서는 SAS의 엔진으로 사용할 태양광 패널의 등가회로 파라미터를 빠르게 추출할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 제안방법은 데이터시트 기반 PV모델 구성기법을 응용한 것으로 빠른 응답속도를 가지는 SAS를 구현하기 위해 공액구배법을 이용한 최적화 방법^[4]을 적용한 방법이며, 제안방법의 타당성은 기존방법과의 성능비교를 통하여 검증한다.

2. 제안방법

2.1 제안방법 정의

PV 등가회로 모델의 파라미터 추출에 최적화 방법을 사용하기 위해서는 우선 목표함수의 설정이다. 목표함수는 데이터시트의 최대 전력점 정보와 P-V 특성곡선의 특징을 이용해 쉽게 구할 수 있다. 먼저, Single-diode회로의 기본수식과 패널의 데이터시트의 최대 전력점 정보를 이용하면 식(1)을 구할 수 있다.

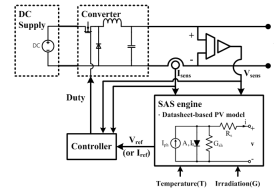


그림 1. Solar Array Simulator

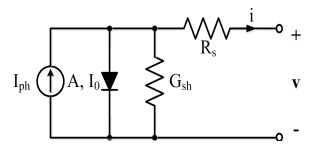


그림 2. Single diode 모델

$$I_{ph} - I_o e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{N_s A V_T}} - (V_{mpp} + I_{mpp}R_s)G_{sh} - I_{mpp} = 0 \quad (1)$$

그리고 P-V특성곡선의 기울기가 V_{mpp} 에서는 0이 된다는 특징을 사용하여 식(2)를 구할 수 있다.

$$\frac{dP}{dV_{Vmpp}} = I_{mpp} - V_{Vmpp} \frac{G_{sh} \left(\frac{I_{sc}/G_{sh} - V_{oc} + I_{sc}R_s}{N_s A V_T} e^{\frac{V_{Vmpp} + I_{mpp}R_s - V_{oc}}{N_s A V_T}} + 1 \right)}{1 + R_s G_{sh} \left(\frac{I_{sc}/G_{sh} - V_{oc} + I_{sc}R_s}{N_s A V_T} e^{\frac{V_{Vmpp} + I_{mpp}R_s - V_{oc}}{N_s A V_T}} + 1 \right)} = 0 \quad (2)$$

위의 식(1)과 (2)를 이용하여 목표함수 식(3)을 구할 수 있다.

$$E(R_s, G_{sh}, A) \equiv f^2(R_s, G_{sh}, A) + g^2(R_s, G_{sh}, A) \quad (3)$$

등가회로를 구성하는 최적의 파라미터는 목표함수가 최소가 되는 지점에서 구할 수 있고 각 파라미터의 탐색범위는 식(4)와 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && E(X) = E(R_s, G_{sh}, A) \\ &\text{subject to} && 0 \leq R_s \leq \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} \\ &&& 0 \leq G_{sh} \leq \frac{I_{sc} - I_{mpp}}{V_{Vmpp}} \\ &&& 0 \leq A_s \leq 2 \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식(1), (2), (3)으로 3개의 변수 R_s , G_{sh} , A 를 최적화 방법으로 구하고 나머지 2개의 파라미터 I_{ph} , I_o 는 연립방정식을 통해 식(5)와 (6)을 쉽게 구할 수 있다.

$$I_{ph} = I_o e^{\frac{qV_{oc}}{N_s AkT}} + V_{oc} G_{sh} \quad (5)$$

$$I_o = [I_{sc} - G_{sh}(V_{oc} - I_{sc}R_s)] e^{-\frac{qV_{oc}}{N_s AkT}} \quad (6)$$

표 1 제안 알고리즘

Step 1 :	<i>Measure Temperature(T) & Irradiation(G)</i> <i>Define</i> $X_1 = (R_{s1}, G_{sh1}, A_1)^T$ <i>Define</i> N_{max} (<i>Maximum iteration</i>) <i>Define</i> ϵ (<i>tolerance</i>)
Step 2 :	<i>If</i> $i = 1$ $S_1 = -\nabla E(X_1)$ $X_2 = X_1 + \alpha_1 S_1$ α_1 <i>is determined by minimizing</i> $E(X_2)$ <i>Go to Step 4</i>
Step 3 :	<i>for</i> $i = 2:N_{max}$ $\beta_i = \frac{\nabla E(X_i)^T \nabla E(X_i)}{\nabla E(X_{i-1})^T \nabla E(X_{i-1})}$ $S_i = -\nabla E(X_i) + \beta_i S_{i-1}$ $X_{i+1} = X_i + \alpha_i S_i$ α_i <i>is determined by minimizing</i> $E(X_{i+1})$ <i>Go to Step 4</i>
Step 4 :	<i>Calculate</i> $\Delta E = E(X_{i+1}) - E(X_i)$ <i>Calculate</i> $\Delta X = X_{i+1} - X_i$ <i>If</i> $ \Delta E \leq \epsilon$; <i>Go to Step 5</i> <i>If</i> $\Delta X^T \Delta X \leq \epsilon$; <i>Go to Step 5</i> <i>If</i> $iteration = N_{max}$; <i>Go to Step 5</i> <i>If</i> $\nabla E(X_{i+1})^T \nabla E(X_{i+1}) \leq \epsilon$; <i>Go to Step 5</i> <i>Else</i> <i>Go to Step 3</i>
Step 5 :	<i>Extract</i> R_s, G_{sh} <i>and</i> A . <i>Calculate</i> I_{ph}, I_o

2.2 파라미터 추출 알고리즘

본 논문에서 제안하는 방법은 수렴속도에 장점을 가지는 공역구배법(Conjugate gradient)을 사용한다. 특정 함수의 최소 또는 최대지점을 찾기 위해서 공역구배법은 gradient를 이용한다. gradient를 이용하게 되면 모든 변수를 동시에 고려하면서 해를 찾아 나갈 수 있다. 만약 n개의 변수가 존재하는 경우, 동시에 모든 변수를 고려한 기울기를 이용해서 해를 탐색하기 때문에 수렴속도가 매우 빠르다는 장점을 가진다. 제안 알고리즘은 표1과 같이 Step1의 초기값 설정을 식(7)과 같이 제안한다.

$$X_1 = \left[\frac{V_{oc} - V_{mpp}}{2I_{mpp}}, \frac{I_{sc} - I_{mpp}}{2V_{mpp}}, 1 \right] \quad (7)$$

Step2와 3에서의 목표함수 E(X_i)의 기울기 정보를 이용해서 다음의 해 E(X_{i+1})를 찾는 방법으로 X_{i+1}은 식(8)과 같다.

$$X_{i+1} = X_i + \alpha_i S_i \quad (8)$$

그 다음 E(X_{i+1})의 새로운 기울기 정보와 E(X_i)의 기울기 정보를 이용해 새로운 공역벡터 S_i는 식(9)와 같이 계산하고 공역계수(β)는 식(10)과 같이 계산한다.

$$S_i = -\nabla E(X_i) + \beta_i S_{i-1} \quad (9)$$

$$\beta_i = \frac{\nabla f(X_i)^T \nabla f(X_i)}{\nabla f(X_{i-1})^T \nabla f(X_{i-1})} \quad (10)$$

Step4에서 알고리즘 종료조건을 만족하면 Step5로 가서 파라미터를 추출하고 그렇지 않은 경우 Step3로 돌아가 위의 과정을

표 2 각 태양광 패널 모델의 기존방법과 제안방법 비교

패널종류	MSX120		SQ160PC		KC200GT		TMS245PC	
	반복 횟수	계산시간 (sec)	반복 횟수	계산시간 (sec)	반복 횟수	계산시간 (sec)	반복 횟수	계산시간 (sec)
비교항목	오차율		오차율		오차율		오차율	
	[1]	67	9.547	83	11.78	33	5.148	44
[2]	1.28		1.19		0.87		2.14	
	10	0.437	10	0.359	10	0.905	10	0.328
제안법	1.37		1.75		1.49		0.93	
	3	0.062	10	0.047	11	0.062	4	0.078
	1.16		1.02		1.36		1.07	

반복해서 조건에 만족하는 파라미터를 추출하게 된다.

3. 알고리즘 성능 비교검증

표2를 보면 다양한 패널에 대해 오차와 파라미터 추출속도를 비교분석 한 것이다. SQ160PC는 단결정 실리콘을 이용한 패널이고 나머지는 다결정 실리콘을 이용한 패널이다. 본 논문은 오차를 비교하기 위해 유럽규격 EN50530^[3]을 기준하였고 식(11)과 같다.

$$\epsilon_f(\%) = \frac{1}{0.2V_{mpp}} \int_{V_{mpp \pm 0\%}} \left| \frac{i_s(v) - i_m(v)}{i_m(v)} \right| dv \times 100 \quad (11)$$

여기서 m은 측정값, s는 PSIM 시뮬레이션 값을 의미한다. 비교대상은 기존의 사용하던 방법들^{[1], [2]}을 제안방법과 비교하였다. 각 패널의 반복횟수와 계산시간을 기존의 방법과 제안방법을 비교하면 추출시간이 제안방법이 더 우수하고 오차율 또한 크게 차이가 나지 않다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 SAS의 엔진 알고리즘을 제안한다. 제안하는 PV 모델 기반 방법은 최적화 방법으로 데이터시트만을 이용해서 기존의 파라미터 추출방법 보다 정확하고 빠른 기준치 생성 성능을 제공한다. 그 결과 기존의 방법에 비해서 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 제안모델의 타당성은 EN50530의 규격을 기준으로 평가하였다. 결과적으로 제안모델은 기존의 방법을 대체해서 SAS 엔진에 사용하기에 적합한 것을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2059772)

참고 문헌

[1] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV Panel Model Based on Datasheet Values," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.2392-2396, 2007.
 [2] J.J. Soon and K. S. Low, "Photovoltaic Model Identification Using Particle Swarm Optimization With Inverse Barrier Constraint," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 27, No. 9, Sept., 2012.
 [3] IEC EN50530, Standard for Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters, CENELEC, Stassart 35, B-1050 Brussels.