

해석모델을 이용한 태양광모듈의 성능결과 비교분석

소정훈*, 유병규*, 황혜미*, 유권중*

*한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터(jhso@kier.re.kr)

Comparison Results of Photovoltaic Module Performance using Simulation Model

So, Jung-Hun*, Yu, Byung-Gyu*, Hwang, Hye-mi*, Yu, Gwon-Jong*

*Photovoltaic Research Group, Korea Institute of Energy Research(jhso@kier.re.kr)

Abstract

The modeling of PV (Photovoltaic) module is useful to perform detailed analysis of PV system performance for changing meteorological conditions, verify actual rated power of PV system sizing and determine the optimal design of PV system and components. This paper indicates a modeling approach of PV module performance in terms of meteorological conditions and identifies validity of this modeling method by comparing measured with simulated value of various PV modules using simulation model.

Keywords : 태양광발전(Photovoltaic), 수치해석(Numerical analysis), 모델링(Modeling), 성능해석(Performance simulation), 모델파라미터(Model parameter)

1. 서 론

21세기는 화석연료로 시작한 산업혁명보다 큰 에너지원의 변환이 태양에너지를 중심으로 한 청정한 신재생에너지의 사용으로 변환되고 있어 미래에너지의 흐름은 신재생에너지의 시대로 전환될 것이다.¹⁾ 태양광발전(PV, Photovoltaic)을 중심으로 한 친환경적인 재생가능 에너지가 지구환경 문제의 해결 방안으로 급격하게 대두되

면서 전세계적으로 태양광발전의 이용보급 및 기술개발이 본격적으로 진행되고 있다.¹⁾²⁾ PV시스템은 실제 옥외에 설치되어 운전하기 때문에 동일한 태양광모듈과 PV용 인버터를 사용하더라도 일사강도 및 온도 등의 환경변화에 의해서 PV시스템의 발전성능은 동일하지 않고 변화된다.²⁾³⁾

PV시스템의 구성요소인 태양광모듈은 일반적으로 표준시험조건(STC, Standard testconditions)

투고일자 : 2008년 07월 08일, 심사일자 : 2008년 07월 15일, 게재확정일자 : 2008년 08월 14일,
교신저자 : 소정훈(jhso@kier.re.kr)

인 일사강도 1kW/m^2 , 모듈표면온도 25°C , AM (Air mass) 1.5인 기준 스펙트럼에서 발전성능을 정격출력으로 결정한다.¹⁾⁻⁴⁾ 그러나 태양광모듈의 발전성능은 일사강도와 온도변화에 의해서 결정되므로 STC에서의 사양만으로는 실제 옥외에서 태양광모듈의 발전성능을 예측하고 PV시스템 운전시 발생하는 문제점을 진단평가하는 것은 매우 어렵다. 따라서 환경변화에 따른 태양광모듈의 발전성능을 해석할 수 있는 정교한 모델링 방법이 제시된다면 PV시스템 및 구성요소의 손실저감을 통한 에너지이용효율의 개선, 설계시공의 최적화 및 PV시스템의 신뢰성과 유효성을 가진 정량적인 진단평가 방법의 개발과 함께 시스템의 성능과 품질을 보증할 수 있는 사후유지관리 기술의 확립이 가능하다.¹⁾⁻³⁾

본 논문에서는 국내에 설치 보급된 다양한 태양광모듈에 대해서 일사강도와 온도 변화시 발전성능을 해석할 수 있는 정교한 모델링 방법을 제시하고 성능해석에 의한 예측값과 실측값을 비교분석하여 제시한 모델링 방법의 정밀도와 유효성을 검토하였다.

2. 태양광모듈 모델링

2.1 모델링 개요

태양광모듈은 태양빛을 흡수하면 전기를 발생시키는 원리인 광기전력 효과를 이용한 것으로 다수의 태양전지 셀을 직병렬로 연결구성한 발전장치이다.²⁾³⁾

그림 1은 태양빛의 입사시 광기전력 효과에 의한 태양광모듈의 등가회로를 보여준다. 그림에서 보면 태양광모듈의 출력전류 I 은 5개의 모델파라미터로부터 수학적으로 구할 수 있다. 태양광모듈은 일사강도와 온도의 변화에 따라서 $I-V$ 특성곡선은 전기적으로 비선형성을 가지며 모델 파라미터값도 일정하지 않고 변화한다.

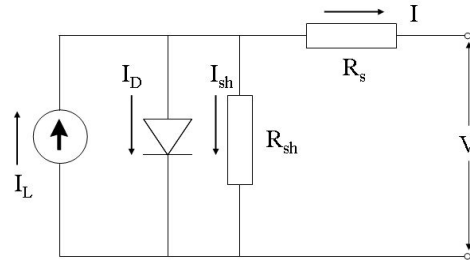


그림 1. 태양전지 셀의 등가회로

그림 1의 등가회로에서 태양광모듈의 출력전류 I 는 다음의 식으로 나타낸다.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{AT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

여기서 I_L 은 광전류, I 는 역포화전류, V 는 태양광모듈의 출력전압, A 는 다이오드 곡선보정계수, R_s 는 직렬저항, R_{sh} 는 병렬저항 그리고 T 는 표면온도이다.

일반적으로 실리콘 결정계의 경우 $R_s \gg R_{sh}$ 이므로 R_{sh} 는 무한대로 가정할 수 있다. 이러한 조건에서 식 (1)의 태양광모듈의 $I-V$ 특성을 다시 표현하면 다음의 식으로 나타낸다.⁴⁾⁵⁾

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{AT_c}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

2.2 모델링 방법

태양광모듈의 $I-V$ 특성곡선은 식 (2)의 모델 파라미터인 I_L , I_0 , R_s , 그리고 A 에 결정되므로 STC에서 제시된 태양광모듈의 단락전류 I_s , 개방전압 V , 최대출력전류 I_{mp} , 그리고 최대출력전압 V_{mp} 를 사용하여 모델링과 함께 수치해석을 수행하면 태양광모듈의 $I-V$ 특성곡선을 구할 수 있다. STC에서 단락시 I 는 매우 작아 거의 0이므로 I_s 는 I_L 과 같다고 가정하면 I_s 는 다음의 식으로 나타낸다.

$$I_L = I_{sc} \quad (3)$$

STC에서 개방시 I 는 0 이므로 식 (2)로부터 STC에서의 I_L 는 다음의 식으로 정의한다.

$$I_{o,ref} = \frac{I_L}{\left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{AT_{c,ref}}\right) - 1 \right]} \quad (4)$$

여기서 I_L 는 STC에서의 태양광모듈의 역포화 전류이고 T_c 는 STC에서의 표면온도인 25°C이다.

태양광모듈의 역포화 전류 I_o 는 재료특성과 온도와의 관계로 수학적으로 표현하면 다음의 식으로 나타낸다.⁴⁾⁵⁾

$$I_o = DT_c^{\epsilon} \exp\left(-\frac{\epsilon_g}{AT_c}\right) \quad (5)$$

여기서 D 는 상수, ϵ 재료의 밴드갭 에너지이다.

식 (5)로부터 I_o 는 온도변화시의 비율로 계산되므로 D 는 고려하지 않는다. 따라서 I_o 는 온도와 식 (4)에서 계산한 I_L 와의 관계로부터 다음의 식으로 나타낸다.³⁾⁴⁾⁵⁾

$$I_o = I_{o,ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \times \exp\left[\left(\frac{\epsilon_g}{A}\right)\left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (6)$$

STC에서 최대출력점(MPP, Maximum power point)에서의 I_{mp} 와 V_{mp} 를 식 (3)의 I_L 과 식 (4)의 I_o 와 함께 식 (2)에 대입하여 정리하면 R_s 는 다음의 식으로 나타낸다.⁴⁾⁵⁾

$$R_s = \left(AT_{c,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) - V_{mp} + V_{oc} \right) / I_{mp} \quad (7)$$

I_L 은 일사강도와 온도와의 관계로부터 결정되므로 다음의 식으로 나타낸다.

$$I_L = \left(\frac{G_T}{G_{T,ref}}\right) [I_{L,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (8)$$

여기서 G 는 일사강도, $G_{T,ref}$ 는 STC에서 일사

강도인 1kW/m² 그리고 $\mu_{I,sc}$ 는 단락전류의 온도 계수이다.

2.3 수치해석 방법

환경변화에 따른 태양광모듈의 $I-V$ 특성곡선을 구하기 위해서 미분방정식을 이용하여 근사해를 얻을 수 있는 수치해석방법인 4차 Runge-Kutta (RK4) 을 사용하였다.⁶⁾ RK4는 각 단계에서의 함수값을 계산하는 대신에 고차 미분방정식을 구할 필요가 없다. 그리고 수치해석 결과에 대해서 정확하고 안정적이며 구현하기가 쉽다. 식(2)을 미분방정식으로 표현하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f'(I) = \frac{R_s}{AT_c} f(I) + \frac{R_s}{AT_c} (I - I_L) - 1 \quad (9)$$

2.4 성능해석 프로그램

일사강도 및 온도 변화시 모델파라미터인 I_L , R_s 그리고 A 는 식 (3)- 식 (8)으로부터 결정할 수 있다. 이들 모델파라미터와 식(9)로부터 해석을 통한 태양광모듈의 성능해석을 수행하였다.

그림 2는 일사강도 및 온도변화시 태양광모듈의 $I-V$ 특성곡선을 구하기 위해서 RK4를 이용한 설계한 성능해석 프로그램을 보여준다.

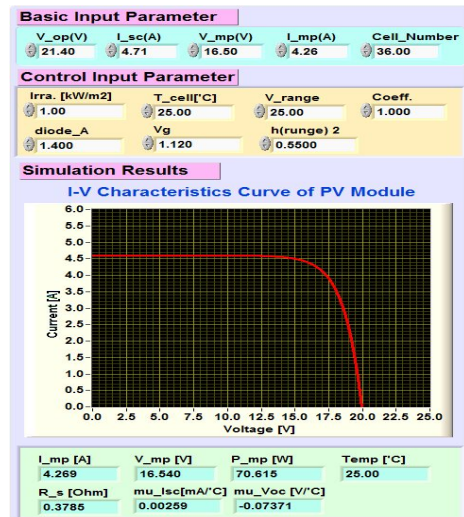


그림 2. 태양광모듈의 성능해석 프로그램

그림 3은 성능해석 프로그램을 사용하여 일사강도 및 온도 변화에 따른 태양광모듈의 I-V 특성곡선을 성능해석한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 태양광모듈은 온도 및 일사강도가 증가할수록 단락전류는 증가하지만 개방전압과 최대출력은 일사강도 및 온도에 반비례하여 감소한다.

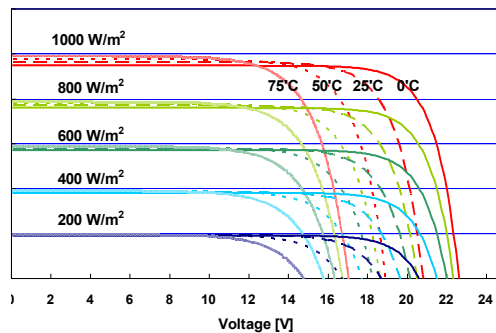


그림 3. 태양광모듈 I-V 특성곡선

표 1과 표 2는 일사강도와 온도변화에 따른 성능해석 결과의 정밀도와 유효성을 확인하기 위해서 Shell solar사의 70W급 단결정 태양광모듈인 SP70의 사양과 수치해석을 이용한 모델링방법으로 성능해석한 예측값과의 잔차에 대해서 비교분석 결과를 보여준다. 태양광모듈의 성능해석 결과를 비교분석 하기 위해서 사용한 잔차는 다음의 식으로 나타낸다.

$$R_{PV} = \frac{|P_{PV,(Stc(Meas))} - P_{PV,Esti}|}{P_{PV,Stc(Meas)}} \times 100 \quad (10)$$

여기서 R_P 는 잔차, $P_{P, (M_s)}$ 는 태양광모듈의 사양 혹은 실측값, $P_{P, s}$ 는 성능해석에 의한 예측값이다.

표에서 보면 일사강도 $1kW/m^2$, AM 1.5인 기준스펙트럼 조건에서 표면온도가 $-25^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$ 로 변화시 최대출력전압 P_{mp} , V_{mp} 및 I_{mp} 의 잔차는 모두 0.7%이하이다. 표면온도 $25^{\circ}C$ 에서 일사강도가 $0.8kW/m^2$ 로 변화시 최대출력전압 P_{mp} , V_{mp} 및 I_{mp} 의 잔차는 모두 0.8%이하

로 제시한 태양광모듈의 성능해석을 위한 모델링 방법은 일사강도 및 온도변화에 대해서 정확하게 발전성능을 예측한다는 것을 확인하였다.

표 1. 온도변화시 태양광모듈의 잔차비교

항목		$-25^{\circ}C$	$0^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$50^{\circ}C$
P_{mp}	사양값 [W]	85.75	77.88	70.00	62.13
	예측값 [W]	86.15	78.34	70.16	62.15
	잔 차 [%]	0.46	0.58	0.23	0.03
V_{mp}	사양값 [V]	20.30	18.40	16.50	14.60
	예측값 [V]	20.28	18.38	16.45	14.59
	잔 차 [%]	0.10	0.11	0.30	0.07
I_{mp}	사양값 [A]	4.23	4.23	4.24	4.25
	예측값 [A]	4.25	4.26	4.26	4.26
	잔 차 [%]	0.57	0.67	0.53	0.09
측정기준		일사강도 $1kW/m^2$, AM 1.5			

표 2. 일사강도변화시 태양광모듈의 잔차비교

항목		$0.8kW/m^2$	$0.6kW/m^2$	$0.4W/m^2$
P_{mp}	사양값 [W]	55.38	40.29	25.77
	예측값 [W]	55.19	40.09	25.71
	잔 차 [%]	0.36	0.48	0.22
V_{mp}	사양값 [V]	16.10	15.80	15.25
	예측값 [V]	16.16	15.73	15.19
	잔 차 [%]	0.37	0.44	0.39
I_{mp}	사양값 [A]	3.44	2.55	1.69
	예측값 [A]	3.42	2.549	1.369
	잔 차 [%]	0.73	0.04	0.18
측정기준		표면온도 $25^{\circ}C$, AM 1.5		

3. 태양광모듈 성능결과 비교분석

3.1 성능해석 대상 태양광모듈

본 논문에서 제시한 모델링방법을 적용한 태양광모듈의 성능해석 프로그램으로 성능해석을 수행한 결과의 신뢰성과 유효성을 확인하기 위해서 15개 태양광모듈에 대해서 성능해석을 수행하여 실측값과 비교분석하였다. 성능해석에 사용된 대상 태양광모듈의 세부사양을 정리하면 표 3과 같다. 표에서 제시된 사양은 발전성능 시험장치인 Solar Simulator을 사용하여 STC에서

측정한 태양광모듈의 실측값이고 태양광모듈의 태양전지 셀은 실리콘 다결정, 단결정, HIT(Hetero junction with intrinsic thin layer) 및 아몰퍼스 태양전지 셀을 사용하여 직렬 연결 구성하였고 정격출력의 범위는 64W급에서 210W급이다.

표 3. 성능해석 대상 태양광모듈의 세부사양

실측값	PV_1	PV_2	PV_3	PV_4	PV_5
P_{mp} [W]	68.43	72.46	77.87	203.11	165.87
V [V]	21.33	21.34	21.67	49.5	44.2
I_s [A]	4.72	4.75	4.80	5.80	5.28
V_{mp} [V]	16.1	16.85	17.6	37.2	34.7
I_{mp} [A]	4.25	4.3	4.47	5.46	4.78
Cell type	단결정	다결정	다결정	HIT	단결정
실측값	PV_6	PV_7	PV_8	PV_9	PV_10
P_{mp} [W]	127.42	192.73	126.06	126.35	161.32
V [V]	21.9	32.8	24.1	22.0	44.0
I_s [A]	7.88	8.06	7.25	7.81	5.08
V_{mp} [V]	17.6	25.8	19.1	17.5	35.3
I_{mp} [A]	7.24	7.47	6.6	7.22	4.57
Cell type	다결정	다결정	다결정	다결정	단결정
실측값	PV_11	PV_12	PV_13	PV_14	PV_15
P_{mp} [W]	127.27	206.12	172.04	174.12	64.35
V [V]	22.0	47.6	44.3	44.7	23.8
I_s [A]	7.82	5.72	5.26	5.34	4.80
V_{mp} [V]	17.8	38.6	35.4	35.9	16.5
I_{mp} [A]	7.15	5.34	4.86	4.85	3.90
Cell type	단결정	단결정	단결정	단결정	아몰퍼스

값과 사이의 출력간차를 종합적으로 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 태양광모듈의 성능해석결과 비교분석

예측값	PV_1	PV_2	PV_3	PV_4	PV_5
P_{mp} [W]	68.46	72.49	77.80	203.39	165.93
V_{mp} [V]	16.07	16.70	17.35	37.47	34.29
I_{mp} [A]	4.26	4.34	4.48	5.43	4.84
잔 차	PV_1	PV_2	PV_3	PV_4	PV_5
P_{mp} [W]	-0.03	-0.04	0.07	-0.28	-0.06
V_{mp} [V]	0.03	0.15	0.09	-0.27	0.41
I_{mp} [A]	-0.01	-0.04	-0.02	0.03	-0.06
예측값	PV_6	PV_7	PV_8	PV_9	PV_10
P_{mp} [W]	127.48	193.02	126.00	126.67	161.62
V_{mp} [V]	17.55	25.93	18.93	17.59	35.09
I_{mp} [A]	7.26	7.44	6.66	7.20	4.61
잔 차	PV_6	PV_7	PV_8	PV_9	PV_10
P_{mp} [W]	-0.06	-0.30	0.06	-0.32	-0.30
V_{mp} [V]	0.05	-0.13	0.17	-0.09	0.21
I_{mp} [A]	-0.02	0.03	-0.06	0.02	-0.04
예측값	PV_11	PV_12	PV_13	PV_14	PV_15
P_{mp} [W]	127.38	206.52	172.15	174.11	64.41
V_{mp} [V]	17.66	38.7	35.35	35.65	16.51
I_{mp} [A]	7.21	5.34	4.87	4.88	3.90
잔 차	PV_11	PV_12	PV_13	PV_14	PV_15
P_{mp} [W]	-0.11	-0.50	-0.11	0.00	-0.06
V_{mp} [V]	0.14	-0.10	0.05	0.25	-0.01
I_{mp} [A]	-0.06	0.00	-0.01	-0.03	0.00

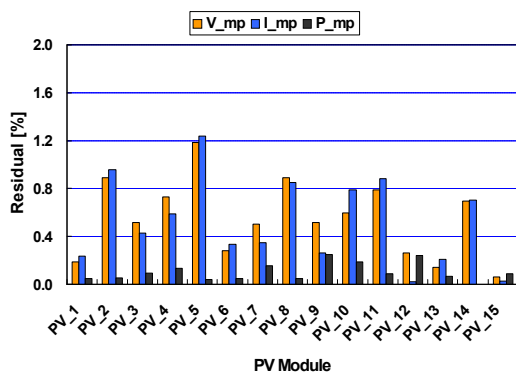


그림 4. 일사강도 변화시 태양광모듈의 잔차 비교

태양광모듈의 실측값과 성능해석에 의한 예측

4. 결 론

PV시스템은 동일한 태양광모듈 및 PV용 인버터를 사용하더라도 설치환경 및 설계시공에 따라 발전성능은 변화된다. 따라서 다양화 복잡화 되는 PV시스템의 종합적인 성능특성을 정량화하기 위해서는 모델링과 진단평가 기술의 개발이 매우 중요하다. 본 논문에서는 일사강도와 온도변화시 태양광모듈의 발전성능을 해석할 수 있는 수치해석을 이용한 모델링방법으로 성능해석한 결과를 실측값과 비교분석하였다. 성능해석 결과로부터 제시한 모델링방법의 정밀도와 유효성을 확인하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음

과 같다.

- (1) 일사강도 및 온도 변화시 태양광모듈의 모델링 방법을 제시하였고 설계한 성능해석 프로그램을 사용하여 15개 태양광모듈에 대해서 성능해석을 수행하였다.
- (2) 수치해석을 이용한 모델링방법의 성능해석 결과로부터 15개 태양광모듈의 P_{mp} , V_{mp} 및 I_{mp} 에 대한 잔차가 1.25%이하로 태양광모듈 실측값의 계측오차를 고려하면 발전성능을 정확하게 예측한다는 것을 확인하였다.
- (3) 제시한 모델링방법과 성능해석 프로그램은 실제 PV시스템의 성능저하 및 발생손실 등의 정량적인 성능진단평가에 적용할 수 있고 정밀도를 개선할 수 있다.

향후에는 PV시스템은 다양화 및 복잡화가 예상됨에 따라 태양광모듈과 어레이에 발생하는 그들과 미스매치가 성능저하 뿐만 아니라 심각한 문제점이 주요 원인이 될 수 있으므로 이에 대한 모델링과 평가분석 방법에 대해서 연구를 계속 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2006년도 지식경제부 신·재생에너지기술개발사업의 일환으로(2006-N-P V12-P-04) 수행되었음

참 고 문 헌

1. 소정훈, 정영석, 유병규, 유권종, 최주엽, PV 시스템 최적화를 위한 손실요인 분석, 전력전자학회 논문집, Vol. 11, No. 1, 2006, pp. 22-28
2. 소정훈, 유병규, 황혜미, 유권종, 최주엽, 50kW 급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능모니터링 결과 및 평가분석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 27, No. 2, 2007, pp. 29-36.
3. T. Oozeki, K. Otani and K. Kurokawa, An evaluation method for PV system to ident

- ify system losses by means of utilizing monitoring data, In : Proceedings of 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006, pp. 2319-2322.
4. W. Desoto, S.A. Klein and W.A. Beckman, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, Vol. 80, Issue 1, 2006, pp 78-88.
5. R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache and A. Bouzidura, A detailed modeling method for photovoltaic cells, Energy, Vol. 32, Issues 9, 2007, pp 1724-1730.
6. W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing, Cambridge Univ. Press, 2nd Edition, 1992, pp. 710-715.