

계통연계형 태양광발전시스템의 성능 추정방법

소정훈*, 이봉섭**, 유진수*, 황혜미*, 유권종*

*한국에너지기술연구원 태양광연구단(jhso@kier.re.kr)
**강원대학교 삼척캠퍼스 제어계측공학과(mirine@kangwon.ac.kr)

Performance Estimation Method of Grid-Connected Photovoltaic System

So, Jung-Hun* Lee, Bong-Seob** Yoo, Jin-Su* Hwang, Hye-mi* Yu, Gwon-Jong*

*Photovoltaic Research Center, Korea Institute of Energy Research(jhso@kier.re.kr)
**Dept. of Control & Instrumentation Eng., Kangwon National University Samcheok campus(mirine@kangwon.ac.kr)

Abstract

This paper presents performance estimation approach of grid-connected photovoltaic(PV) system to predict energy yield from irradiance to PV system using normalized yield model for changing meteorological conditions. The accuracy and validity of proposed performance estimation method is identified by compared measured with estimated yield using monitored data. These results will indicate that it is useful to estimate various loss factors causing the system performance obstruction and enhance the lifetime yield of PV system.

Keywords : 태양광발전(Photovoltaic), PV어레이(PV array), 모델링(Modeling), 성능추정(Performance estimation), 등가 가동시간(Yield)

기 호 설 명

$G_{A,Meas}$: 경사면 일사강도 [W/m^2]	$Y_{A,Meas}$: PV어레이 등가 가동시간 실측값
$G_{A,Ref}$: 1,000 [W/m^2]	$Y_{P,Esti}$: PV시스템 등가 가동시간 실측값
$P_{A,Meas}$: PV어레이 출력 실측값 [W]	$Y_{AM,Esti}$: PV어레이 최대 등가 가동시간 추정값
$P_{P,Meas}$: PCS 출력 실측값 [W]	$Y_{AT,Esti}$: PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간 추정값
P_{AS} : PV어레이 설치용량 [W]	α_M : PV어레이 최대 성능계수
Y_R : 태양 등가 가동시간	a_T, b_T : PV어레이 온도계수
$Y_{A,Esti}$: PV어레이 등가 가동시간 추정값	η_A : PV모듈 노화계수
$Y_{P,Esti}$: PV시스템 등가 가동시간 추정값	α_{AT} : PV모듈 온도 보정계수

투고일자 : 2010년 10월 19일, 심사일자 : 2010년 10월 25일, 게재확정일자 : 2010년 12월 3일
교신저자 : 소정훈(jhso@kier.re.kr)

1. 서 론

태양광발전(PV, Photovoltaic) 시스템은 입력 에너지인 일사강도로부터 직류출력으로 변환하는 PV어레이, 직류출력을 교류출력으로 변환하는 태양광 인버터(PCS, Power Conditioning System)로 구성되는데, 실제 PV시스템은 PV 모듈, PV어레이 및 PCS의 성능뿐만 아니라, 일사강도, 온도 및 풍속 등의 주변 환경 변화에 따라서 성능도 변화한다.¹⁾ 따라서 표준시험조건(STC, Standard Test Conditions)인 일사강도 1kW/m^2 , PV모듈 표면온도 25°C 및 AM(Air mass) 1.5에서의 PV모듈과 PV어레이의 성능과 정격조건에서의 PCS의 성능 등의 기본 정보만으로는 PV시스템의 실제 출력전력과 같은 성능을 추정하는 것은 어렵다.

PV시스템은 다른 재생에너지원과 비교해서 내구수명이 길어 유지점검이 거의 필요 없다고 하지만, 실제 PV어레이의 그늘발생, 온도상승, 미스매치, 오염·열화, PCS의 성능저하, PV시스템의 설계 및 시공 등에 따른 고장 혹은 결함으로 초기 설계 시에 기대했던 성능이 나오지 않는 경우가 발생한다.²⁾ 현재까지의 방법으로는 단지 발전량 및 운전유무 등의 운전현황에 대한 조사를 통하여 정성적으로 파악하거나 PV시스템의 성능지수인 성능계수(PR, Performance Ratio)로부터 성능을 비교 분석하지만, PR에는 많은 손실을 포함하고 있기 때문에 단지 PR만으로는 PV시스템의 성능저하, 고장 혹은 결함 등의 이상 유무를 정확하게 판단하기가 어렵다.³⁾ 주변 환경의 변화에 따른 PV시스템의 장기간 성능저하, 고장 혹은 결함 등의 이상 유무를 신속하고 보다 쉽게 판단할 수 있는 신뢰성과 유효성을 가진 정보가 제공되지 않는다면 PV시스템의 장기간 성능과 품질을 보증할 수 없으므로 진정한 의미의 친환경적인 에너지원이라고 할 수 없다.⁴⁾ 따라서 주변 환경변화에 대하여 PV시스템의 성능을 정량적인 값으로

추정할 수 있는 방법이 제시된다면 PV시스템의 성능저하나 고장 혹은 결함 등의 이상 유무를 신속하고 보다 쉽게 판단할 수 있어 PV시스템은 수명이 다할 때까지 항상 좋은 성능을 유지할 수 있다.⁵⁾

본 논문에서는 PV시스템에서 수집된 운전자료로부터 등가 가동시간을 이용한 성능추정모델을 사용하여 설치용량과 상관없이 PV시스템 성능저하, 고장 혹은 결함 등의 이상 유무를 보다 쉽고 신속하게 판단하는데 필요한 정보를 정량적인 값으로 나타낼 수 있는 범용성과 유용성을 가진 PV시스템의 정규화 성능 추정방법을 제시하고자 한다. 그리고 성능 추정모델에 의한 PV시스템의 추정값과 실측값을 종합적으로 비교 분석하여 제시한 성능 추정방법의 정밀도와 유효성에 대해서 고찰하였다.

2. 성능 추정개요 및 방법

PV시스템은 수십W급에서 MW급까지의 설치용량을 가진 다양한 시스템으로 설치가 가능하고 PV 구성기기뿐만 아니라 일사강도, 온도 및 풍속 등의 주변 환경 변화에 따라서 성능도 변화한다. 따라서 설치용량과 상관없이 주변 환경의 변화에 따른 PV시스템의 성능을 추정하기 위하여 등가 가동시간을 이용한 범용성과 유용성을 가진 정규화 성능 추정방법을 제시한다. PV시스템의 입력에너지인 경사면 일사강도에서 시스템의 출력전력과의 관계로부터 등가 가동시간을 이용한 정규화 성능 추정방법은 다음과 같다.

수집된 운전자료로부터 PV시스템의 등가 가동시간인 Y_R , $Y_{A,Meas}$ 및 $Y_{A,Meas}$ 는 다음의 식으로 나타낸다.³⁾

$$Y_R = G_{A,Meas} / G_{A,Ref} \quad (1)$$

$$Y_{A,Meas} = P_{A,Meas} / P_{AS} \quad (2)$$

$$Y_{P,Meas} = P_{P,Meas} / P_{AS} \quad (3)$$

그림 1은 수집된 운전자료로부터 PV시스템의 등가 가동시간 실측값인 Y_R , $Y_{A,Meas}$ 및 $Y_{P,Meas}$ 성능분포를 나타낸다. 그림에서 보면 Y_R 은 일정한 분포를 나타내지만, $Y_{A,Meas}$ 및 $Y_{P,Meas}$ 는 성능변화가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 동일한 일사강도를 가지더라도 풍속 및 온도 등의 주변 환경의 변화에 따라서 PV시스템의 성능에 영향을 미치는 손실 요인들이 많다는 것을 의미한다.

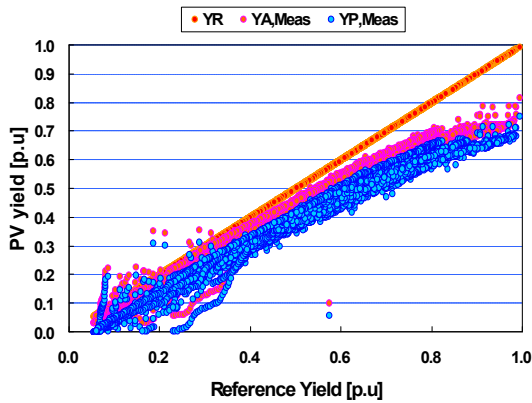


그림 1. 등가 가동시간 분포

PV시스템에서 수집된 운전자료로부터 분석결과인 등가 가동시간과 주변 환경의 변화에 따른 성능과 발생 손실과의 상관관계를 분석한 결과를 토대로 STC에서 PV어레이의 발생 손실이 최소인 PV어레이의 최대 등가 가동시간은 다음의 식으로 나타낸다.

$$Y_{AM,Esti} = \alpha_M^* Y_R \quad (4)$$

STC에서 온도상승에 따른 손실과의 관계인 PV어레이 온도보정 후 등가 가동시간은 다음의 식으로 나타낸다.

$$Y_{AT,Esti} = (1 - \eta_A) \cdot (a_T \cdot Y_R + b_T) \quad (5)$$

PV어레이의 출력전력인 PV어레이 등가 가동시간은 다음의 식으로 나타낸다.⁶⁾

$$Y_{A,Esti} = Y_{AT,Esti} \cdot (1 + \alpha_{AT} \cdot (T_C - 25)) \quad (6)$$

그리고 PCS의 출력전력인 PV시스템의 등가 가동시간은 다음의 식으로 나타낸다.⁷⁾

$$Y_{P,Esti} = a_P \cdot Y_{A,Esti}^2 + b_P \cdot Y_{A,Esti} + c_P \quad (7)$$

그림 2는 수집된 운전자료로부터 주변 환경의 변화에 따른 성능과 발생 손실과의 상관관계를 분석한 결과를 토대로 식(4)-(7)의 성능 추정모델을 사용하여 PV시스템의 추정값인 $Y_{AM,Esti}$, $Y_{AT,Esti}$, $Y_{A,Esti}$ 및 $Y_{P,Esti}$ 에 대한 성능 추정곡선을 나타낸다.

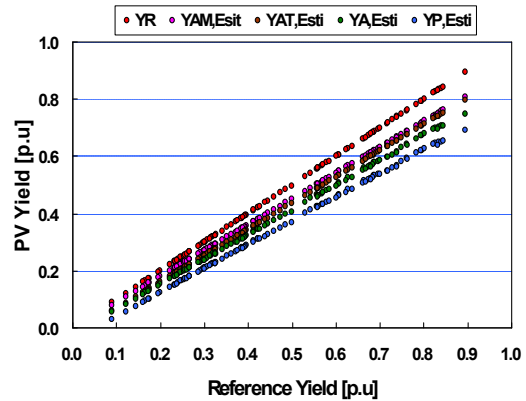


그림 2. 성능 추정곡선

그림 3과 4는 식(4)-(7)의 성능 추정모델을 사용하여 주변 환경의 변화에 따른 PV시스템의 $Y_{AM,Esti}$, $Y_{AT,Esti}$, $Y_{A,Esti}$ 및 $Y_{P,Esti}$ 에 대한 시간별 성능 추정곡선을 나타낸다. PV시스템의 성능 추정결과는 PV시스템의 실제 성능과 비교함으로써 시스템의 고장 혹은 결함 등으로 성능이 떨어지는 원인을 미리 파악할 수 있고, 또한 발생 손실에 대해서도 정량적인 값으로 산출할 수 있어 시스템의 최적설계 및

유지관리 기술 개발로의 적용이 가능하다.

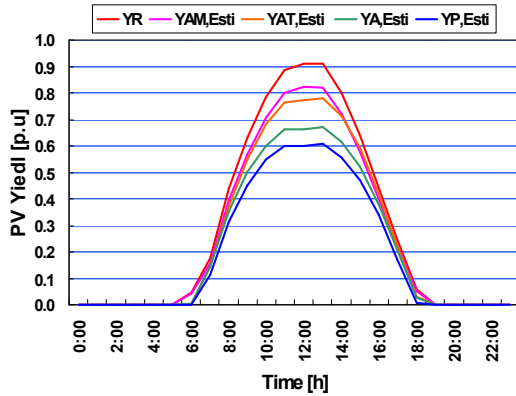


그림 3. 시간별 성능 추정곡선(맑은 날)

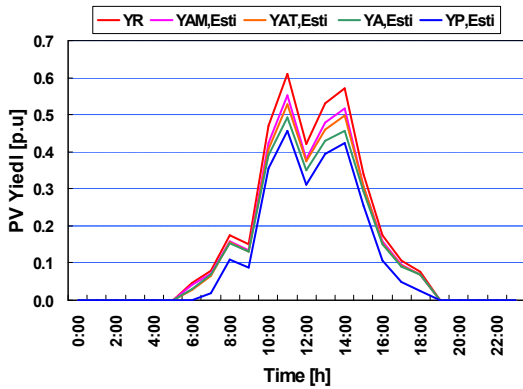


그림 4. 시간별 성능 추정곡선(흐린 날)

3. 성능 추정결과 및 고찰

제시한 PV시스템의 성능 추정방법의 정밀도와 유효성을 확인하기 위해서 설치 운전중인 2kW급 계통연계형 PV시스템을 적용대상 시스템으로 하였다. 그림 5는 적용대상인 2kW급 계통연계형 PV시스템을 보여준다. 2002년에 설치되어 운전되고 있는 PV시스템은 PV어레이의 설치 경사각은 15°, 설치 방위각 0°(정남향)인 평지붕방식으로 설치하였고 PV모듈은 실리콘 단결정 태양전지로 43W급 PV모듈을 24직렬, 2병렬로 연결 구성하여 설치하

였다. 계통연계형 PCS의 정격출력은 3kW, 동작전압은 120~350V 그리고 변환효율은 정격에서 92%이상이다. PV시스템의 성능 추정모델을 설계하기 위해서 전기적 및 기상 센서로부터 운전자료를 수집할 수 있는 감시측측시스템을 구축 운영하여 1초 간격의 샘플링시간으로 PV시스템의 전기적 입출력 및 기상정보를 분별, 시간별로 운전자료를 수집 저장한다.²⁾³⁾



그림 5. 2kW급 계통연계형 PV시스템

2008년부터 2009년까지 수집된 운전자료로부터 식(4)-(7)의 성능 추정모델을 사용하여 PV시스템의 Y_A 와 Y_{Ae} 에 대한 추정값과 실측값을 비교 분석하였다. PV시스템의 성능 추정에 사용한 모델 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 모델 파라미터

항 목	파라미터 값
$a_{M,STC}$	0.9027
a_T	0.9176
b_T	-0.0225
a_{AT}	-0.0035
a_P	-0.0465
b_P	0.9940
c_P	-0.0273

그림 6~12는 표 1의 모델파라미터를 사용한 성능 추정모델로부터 PV시스템의 성능 추정 결과를 나타낸다.

그림 6과 7은 PV시스템의 Y_A 에 대한 월별

시간별 추정값과 실측값을 나타낸다. 그림에서 보면 추정값인 $Y_{A,Esti}$ 는 0.01에서 0.8의 성능분포를 가지며, 실측값인 $Y_{A,Meas}$ 는 0.01에서 0.75의 성능분포를 나타낸다. Y_A 의 추정값과 실측값은 0.01에서 0.2까지 변화범위에 있다.

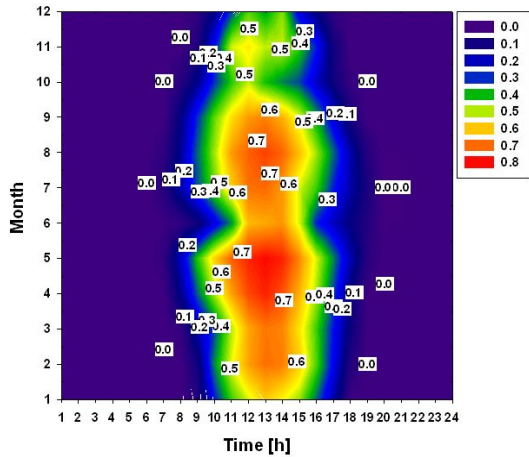


그림 6. 월별 시간별 성능 추정결과($Y_{A,Esti}$)

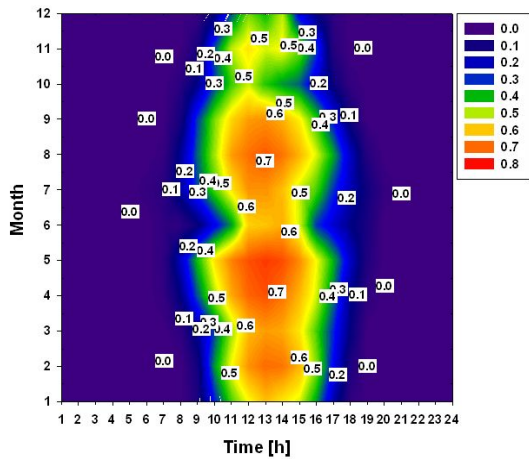


그림 7. 월별 시간별 성능 실측결과($Y_{A,Meas}$)

그림 8과 9는 PV시스템의 Y_P 에 대한 월별 시간별 추정값과 실측값을 나타낸다. 추정값인 $Y_{P,Esti}$ 는 0.01에서 0.7의 성능분포를 가지며 실측값인 $Y_{P,Meas}$ 는 0.01에서 0.75의 성능분포를 나타낸다. Y_P 의 추정값과 실측값은 0.01에

서 0.2까지 변화범위에 있다.

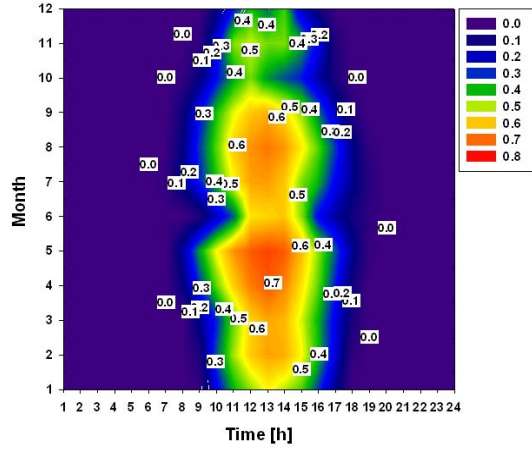


그림 8. 월별 시간별 성능 추정결과($Y_{P,Esti}$)

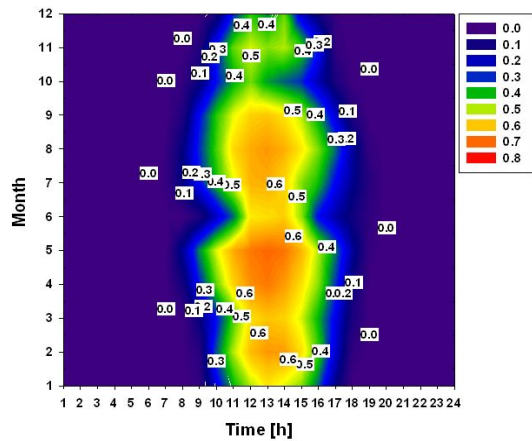


그림 9. 월별 시간별 성능 실측결과($Y_{P,Meas}$)

PV시스템의 Y_A 및 Y_P 에 대한 추정값과 실측값의 차이값인 성능 잔차는 다음의 식으로 나타낸다.

$$R_A = (Y_{A,Esti} - Y_{A,Meas}) / Y_R \quad (8)$$

$$R_P = (Y_{P,Esti} - Y_{P,Meas}) / Y_R \quad (9)$$

여기서 R_A 는 Y_A 의 성능 잔차 그리고 R_P 는

Y_P 의 성능 잔차이다.

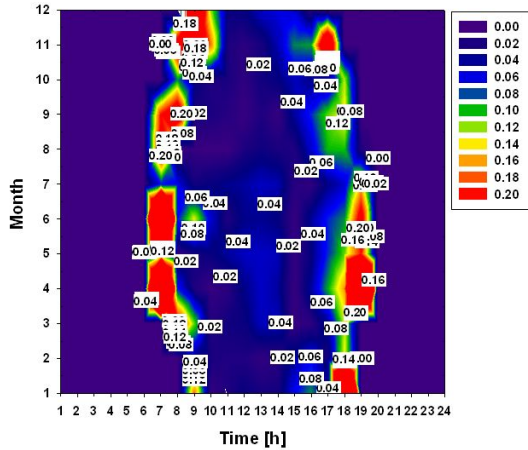


그림 10. 월별 시간별 성능 잔차분포(R_A)

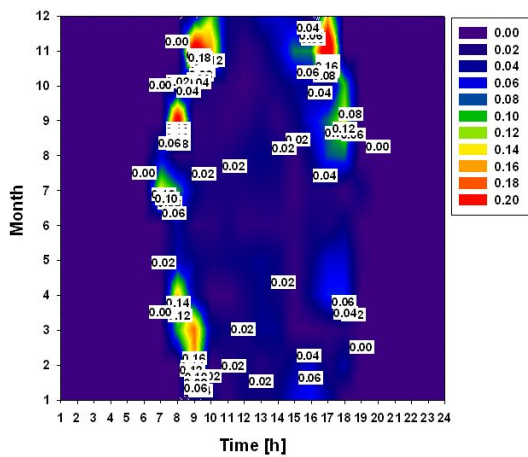


그림 11. 월별 시간별 성능 잔차분포(R_P)

그림 10과 11은 식 (8)과 (9)로부터 PV시스템의 Y_A 및 Y_P 에 대한 추정값과 실측값과의 차이값인 월별 시간별 성능 잔차를 비교 분석한 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 Y_R 이 0.2이하에서는 R_A 및 R_P 의 성능 잔차는 0.1이상의 범위를 가진다. Y_R 이 0.2이상에서는 성능 잔차가 최대 0.1이하로 주변 환경의 변화에 대해서 비교적 정확하게 성능을 추정하는 것을 알 수 있다. Y_R 이 0.2이하인 낮은 일사

강도에서는 일사강도의 변동, 오염, 적설 및 PV어레이 I-V 특성의 비선형성 등으로 Y_R 이 0.2이상인 높은 일사강도에서와 비교하면 PV시스템의 성능변화가 크기 때문에 성능 추정의 정밀도는 떨어진다.

그림 12는 2008년부터 2009년까지 수집된 운전자료로부터 등가 가동시간을 이용한 PV시스템의 Y_A 및 Y_P 에 대한 일별 성능 잔차를 비교 분석한 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 R_A 및 R_P 가 0.1이하에서 R_A 는 92% 그리고 R_P 는 97%의 분포를 가진다. R_A 및 R_P 가 0.1이상에서 R_A 는 8% 그리고 R_P 는 2%의 분포를 나타내는데, 이것은 낮은 일사강도, 적설 및 오염 등의 주변 환경의 급격한 변화 혹은 PV시스템의 성능저하나 고장 혹은 결함 등의 성능장애로 인해서 정상적인 운전되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 제시한 성능 추정방법에 의한 PV시스템의 추정값을 실측값과 비교 분석하여 PV구성기기 및 주변 환경의 변화에 따른 성능저하 혹은 성능장애에 대해서 진단평가를 할 수 있으므로 PV시스템의 장기간의 신뢰성과 안정성과 함께 수명이 다할 때 까지 항상 최대성능을 유지하는데 중요한 도구로의 응용이 가능할 것이다.

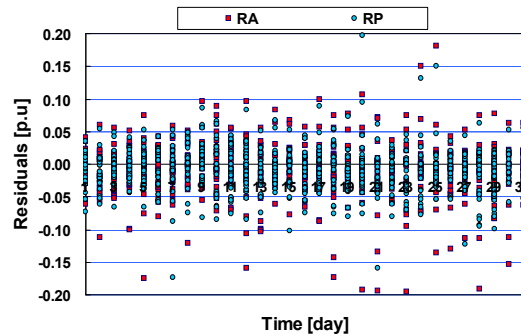


그림 12. 일별 성능 잔차분포(2008년-2009년)

4. 결 론

본 논문에서는 PV시스템에서 수집된 운전

자료로부터 등가 가동시간을 이용한 성능 추정모형을 사용하여 주변 환경의 변화에 따른 PV시스템의 정규화 성능 추정방법을 제시하였고 그 결과에 대해서 종합적으로 고찰하였다.

본 논문에서 수행한 결과를 요약 하면 다음과 같다.

- (1) PV시스템의 성능과 발생 손실과의 상관관계로부터 등가 가동시간을 이용한 성능추정모형을 사용하여 설치용량과 상관없이 PV시스템의 성능을 정량적인 값으로 추정할 수 있는 범용성과 유용성을 가진 성능 추정방법을 제시하였다.
- (2) 성능 추정모형에 의한 PV시스템의 추정값과 실측값을 비교 분석한 결과 성능 잔차 R_A 및 R_P 가 0.1이하에서 R_A 는 92% 그리고 R_P 는 97%의 분포를 나타내어 제시한 성능 추정방법의 정밀도와 유효성을 확인하였다.
- (3) 제시한 성능추정 방법은 설치용량과 상관없이 주변 환경의 변화에 대해서 성능을 추정할 수 있으므로 손실저감을 통한 성능향상 및 최적화를 위한 범용성과 유용성을 가진 성능진단 도구로의 응용이 가능하다.

향후에는 설치환경 및 설계구성에 따른 다양한 PV시스템의 성능데이터베이스 구축과 함께 정밀도와 유효성의 개선과 함께 고장검출 진단방법에 대해서 연구를 계속 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20093020010010)

참 고 문 헌

1. S.K. Firth et al, A Simple Model of PV System Performance and Its Use in Fault Detection, *Solar Energy* 84, 2010, pp. 624-635.
2. 소정훈 외, PV시스템 최적화를 위한 손실요인 분석, *전력전자학회 논문집*, 11권 1호, 2006, pp. 22-28.
3. 소정훈 외, 50kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능모니터링 결과 및 평가분석, *한국태양에너지학회 논문집*, 27권 2호, 2007, pp. 29-36.
4. A. Drews et al, Monitoring and Remote Failure Detection of Grid-Connected PV Systems Based on Satellite Observations, *Solar Energy* 81, 2007, pp. 548-564.
5. N. M. Pearsall et al, Progress on the Modernization of the European PV System Monitoring Guidelines, 23rd EURO PVSEC, 2008, pp 3208-3216.
6. Yuzuru Ueda et al, Performance Analysis of Various System Configurations on Grid-Connected Residential PV System, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 2009, pp. 945-949.
7. Jayanta Deb Mondol et al, The Impact of Array Inclination and Orientation on the Performance of a Grid-Connected Photovoltaic System, *Renewable Energy*, 32, 2007, pp.118-140.