

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 27, No. 2, 2007

50kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능모니터링 결과 및 평가분석

소정훈*, 유병규*, 황혜미*, 유권종*, 최주엽**

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

**광운대학교 전기공학과 (juyeop@daisy.kw.ac.kr)

Performance Monitoring Results, Evaluation and Analysis of 50kW Grid-Connected PV System

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

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

**Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(juyeop@daisy.kw.ac.kr)

Abstract

Monitoring system is constructed for evaluating and analyzing performance of installed 50kW grid-connected PV system and have been monitored since October 2005. As climatic and irradiation conditions have been varied through long-term operation, there is necessity for evaluating numerical values of PV(Photovoltaic) system performance to observe the overall effect of environmental conditions on their operation characteristics. This paper presents performance monitoring results and analysis on component perspective(PV array and power conditioning system) and global perspective(yield, losses) of PV system for one year monitoring periods.

Keywords : PV(Photovoltaic), PR(Performance ratio), Lc(Capture losses), Ls(System losses),
평가분석(Evaluation and analysis), 손실율(Loss factor)

기 호 설 명

PR : Performance Ratio
STC : Standard Test Conditions
Lc : Capture losses

Ls : System losses
EA : PV array output energy [kWh]
EP : System output energy [kWh]
HA : Total irradiation [kWh/m²]
PAS : Nominal output of PV array [kW]
GSTC : Irradiance at STC [kW/m²]

접수일자 : 2007년 3월 20일, 심사완료일자:2007년 5월 7일
교신저자 : 소정훈(jhso@kier.re.kr)

- Y_r : Reference yield [h/d]
- Y_A : PV array yield [h/d]
- Y_P : PV System yield [h/d]

1. 서론

21세기의 시작과 함께 화석연료의 고갈 및 지구 온난화 문제로 효율적인 에너지이용기술과 안전하고 지속가능한 새로운 에너지원의 개발에 대한 관심이 전 세계적으로 확대되고 있고 미래 국가경쟁력이 될 에너지의 안정적인 공급 및 확보를 위하여 자연에너지, 신에너지 및 재생 가능한 에너지원의 개발 및 보급이 본격적으로 시작되고 있다.¹⁾³⁾ 태양광발전(PV, Photovoltaic)을 중심으로 친환경적인 재생가능에너지는 기후변화협약에 따른 지구 환경의 위협성에 대한 해결방안으로 무한하고 청정한 미래의 에너지원으로 전 세계가 주목하고 있으며 이에 대한 기술 개발 및 실용화가 본격적으로 진행되고 있다.¹⁾

본 논문에서는 향후 PV시스템의 중요한 문제가 될 수 있는 PV모듈 및 PCS(Power Conditioning System)의 성능개선, 시스템의 설계시공 및

사후운영관리의 유용성을 위해서 계측데이터를 이용한 PV시스템의 성능특성을 평가분석하는데 있다. 따라서 50kW급 계통연계형 PV시스템의 성능 모니터링을 통한 성능 및 발생손실을 평가분석하기 위해서 감시계측시스템을 설치 운영하였다.¹⁾³⁾ 1년동안 수집된 계측데이터를 사용하여 PV시스템 및 구성요소기기의 성능과 발생손실을 평가 분석하여 정량적인 값으로 나타내었다. 그리고 성능감소 및 손실요인 등의 문제점에 대해서도 종합적으로 검토하였다.

2. PV시스템 평가분석

PV시스템은 PV모듈, PCS 등의 구성요소기기의 성능뿐만 아니라 일사강도 및 온도 등의 환경변화에 따라서 발전성능이 결정된다. 따라서 실제 운전시 PV시스템 및 구성요소기기의 손실저감과 함께 성능개선 및 설계시공의 최적화를 위해서는 발생하는 주요 손실들에 대해서 정량적인 평가분석이 필요하다. 그림 1은 PV시스템의 성능 및 손실의 평가분석에 대한 기본개념을 보여준다. PV시스템에서 발생하는 주요 손실은 설치환경과 설계시공에

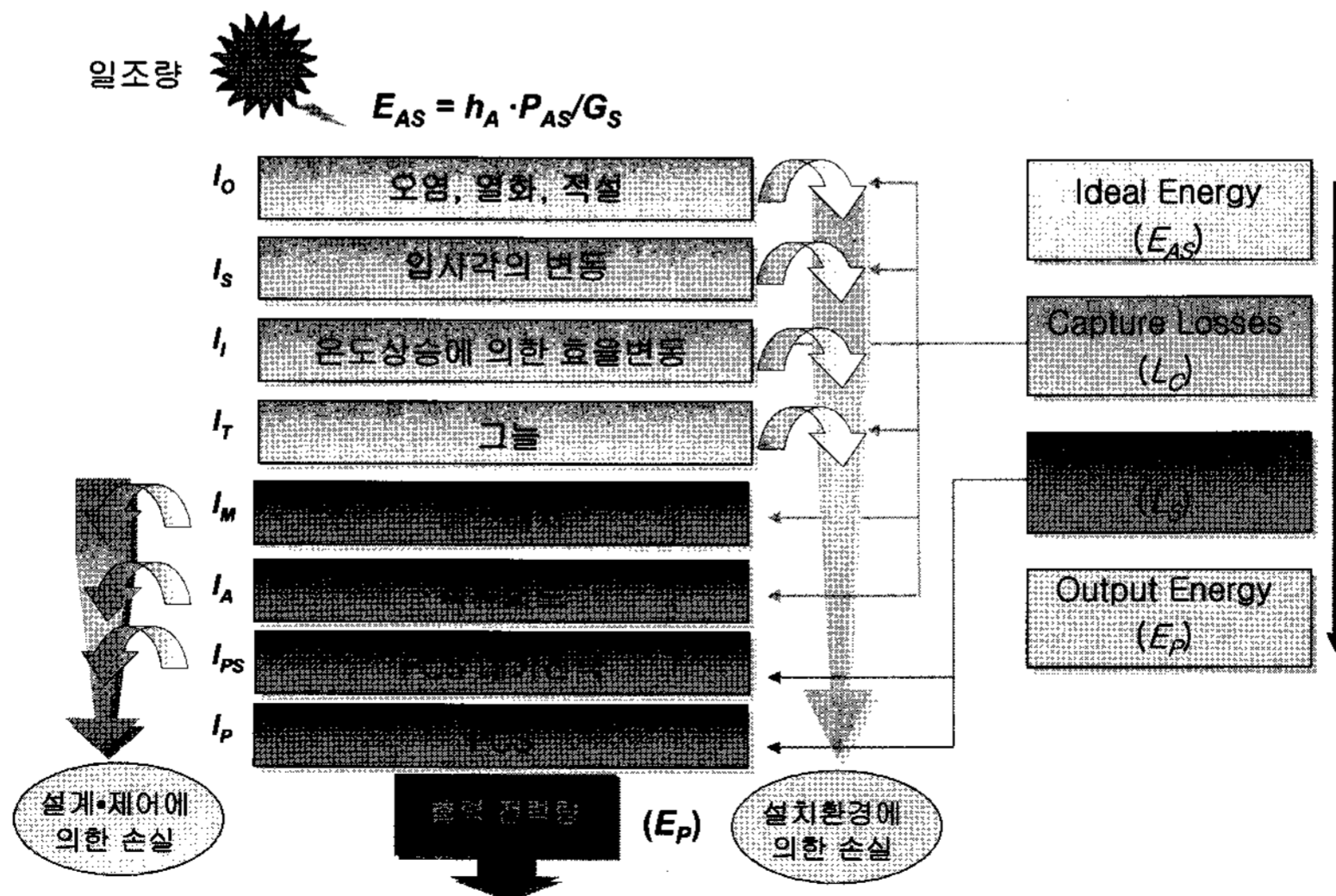


그림 1. PV시스템 평가분석 개요

의한 것을 구분할 수 있다. 설치환경에 의한 손실은 그늘, 입사각 변동, 오염·열화, 적설 및 온도상승 등에 의한 손실이고 설계시공에 의한 손실은 직류회로, 미스매치 및 PCS 손실 등에 의한 손실이다.¹⁾²⁾³⁾

PV시스템의 성능결과를 정량적으로 분석하기 위해서 등가 가동시간을 사용한다. 등가 가동시간은 PV시스템의 성능을 평가 분석하기 위한 성능지수로 다음의 식으로 나타낸다.²⁾⁴⁾

$$Y_r = \frac{H_{A,d}}{G_{STC}} \quad (1)$$

$$Y_A = \frac{E_{A,d}}{P_{AS}} \quad (2)$$

$$Y_P = \frac{E_{P,d}}{P_{AS}} \quad (3)$$

여기서 Y_r 은 등가 태양 일조시간, Y_A 는 등가 PV어레이 가동시간, Y_P 은 등가 시스템 가동시간, $H_{A,d}$ 는 일별 평균 경사면일사량, $E_{A,d}$ 은 일별 평균 PV어레이 출력전력량 그리고 $E_{P,d}$ 는 일별 평균 시스템 출력전력량이다.

PV시스템의 등가 가동시간을 사용하여 성능지수인 PR(Performance Ratio), L_c (Capture Losses) 및 L_s (System Losses)를 계산하여 PV시스템의 성능 및 발생손실을 평가분석한다.¹⁾²⁾ PR은 표준시험조건(STC, Standard Test Conditions)에서 손실을 고려하지 않은 PV시스템의 이상 발전성과 실제 발전성에 대한 비로 고장 및 결함등의 성능특성을 신속하게 평가할 수 있다.¹⁾³⁾ L_c 는 태양에너지로부터 PV어레이가 직류전력으로 변환하는 과정에 발생하는 손실인 PV어레이 손실이다. L_s 는 직류전력에서 교류전력으로 변환하는 과정에서 발생하는 손실인 PCS 손실 혹은 시스템 손실이다. 성능지수인 PR, L_c 그리고 L_s 는 다음 식으로 정의한다.³⁾⁴⁾

$$PR = Y_P / Y_r \quad (4)$$

$$L_c = Y_r - Y_A \quad (5)$$

$$L_s = Y_A - Y_P \quad (6)$$

여기서 PR은 성능계수, L_c 는 PV어레이 손실 그리고 L_s 는 시스템 손실이다.

3. 대상 PV시스템 개요

그림 2는 환경변화에 따른 PV시스템의 성능특성을 평가분석하기 위해서 설치된 50kW급 계통연계형 PV시스템을 포함한 전체시스템의 구성 개요도를 보여주고 있다. 설치된 PV시스템의 PV어레이는 곡면형 평지붕방식으로 설계발전용량은 50kW이다. PV어레이의 평균경사각은 18°, 방위각 5°(남동)이다. PV어레이와 PCS는 설계시공기준에 준하여 설치되었다. 표 1은 일사강도 1000W/m², 모듈온도 25°C 및 AM(Air Mass) 1.5인 STC에서의 PV모듈과 정격시의 PCS의 규격을 나타내고 있다. 장시간의 운전을 통해서 PV시스템의 성능특성을 비교 분석하기 위해서 감시계측시스템을 2005년 8월에 설치 운영하여 현재까지 계측데이터를 수집하고 있다. 표 2는 PV시스템의 성능특성 평가분석에 사용된 계측 및 평가항목을 나타낸다.

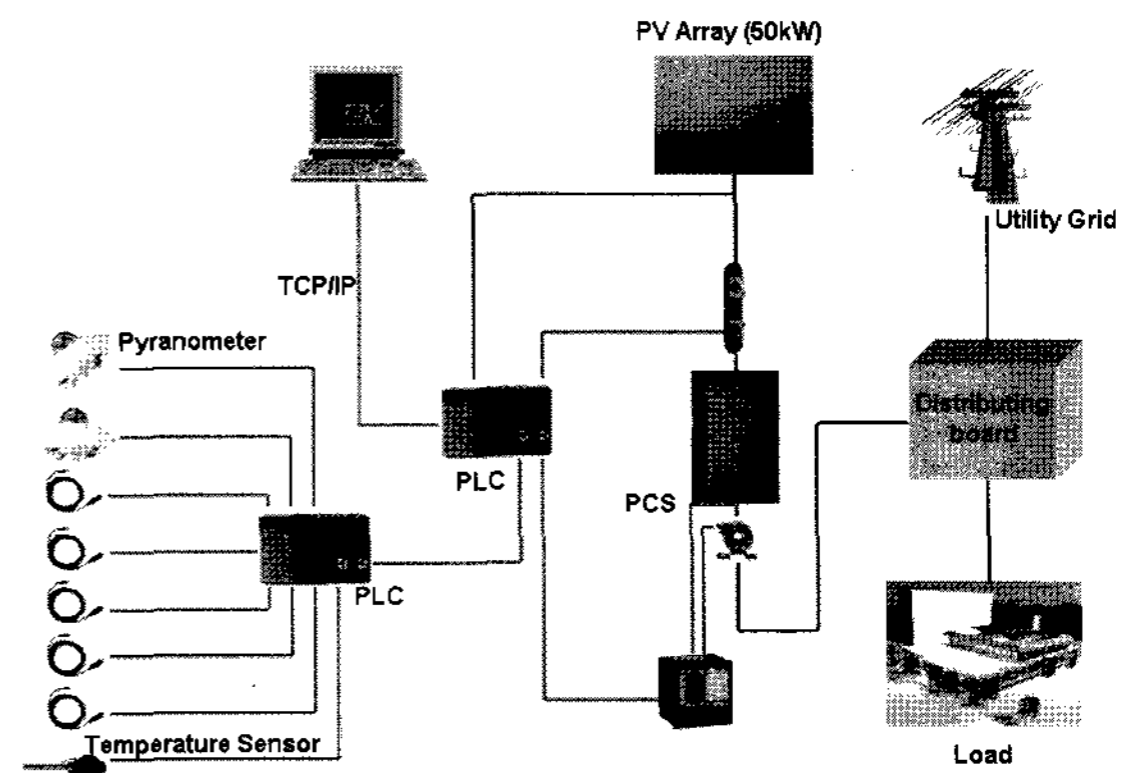


그림 2. 전체 시스템의 구성 개요도

표 1. PV모듈 및 PCS 규격

	항목	비고
PV모듈	최대출력전력 [W]	80
	최대출력전류 [A]	4.55
	최대출력전압 [V]	17.6
	셀 종류	다결정 Si
	PV어레이 구성	17직렬×37병렬
PCS	정격입력전압 [V]	295
	운전동작전압범위 [V]	238~368
	정격출력 [kW]	50
	변환효율(정격시)	90%이상

표 2. 계측 및 평가분석 항목

측정 항목	단위	평가분석 항목	단위
1 수평면 일사강도	W/m ²	1 등가 태양 일조시간	h/d
2 경사면 일사강도	W/m ²	2 등가 어레이 가동시간	h/d
3 외기온도	oC	3 등가 시스템 가동시간	h/d
4 모듈표면온도	oC	4 시스템 성능계수	h/d
5 어레이 출력전압	V	5 PV어레이 손실	h/d
6 어레이 출력전류	A	6 시스템 손실	h/d
7 어레이 출력전력	kW		
8 PCS 출력전압	V		
9 PCS 출력전류	A		
10 PCS 출력전력	kW		

4. PV시스템 성능결과 평가분석

PV시스템의 기본정보와 2005년 9월부터 2006년 8월까지 수집된 계측데이터를 이용하여 PV시스템의 성능, 발생손실 및 운전시 발생하는 문제점을 종합적으로 비교 분석하였다.

그림 3은 계측기간 동안 PV시스템의 월별 등가 가동시간을 보여준다. 식(1)~식(3)을 사용하여 계측데이터를 분석한 결과 PV시스템의 등가 태양 일조시간이 2.6(h/d)~4.8(h/d), 등가 PV어레이 가동시간이 2.0(h/d)~3.6(h/d) 그리고 등가 시스템 가동시간이 1.8(h/d)~3.3(h/d)이다. 연간평균 등가 태양 일조시간은 3.7(h/d), 등가 PV어레이 가동시간은 2.9(h/d) 그리고 등가 시스템 가동시간 2.6(h/d)이다.

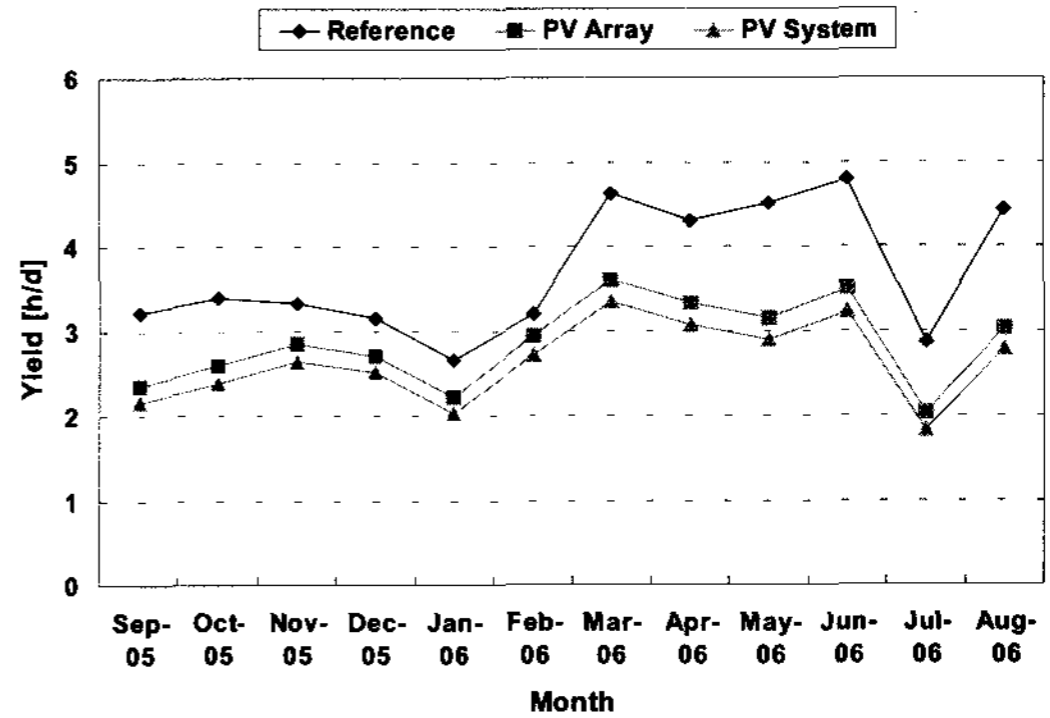


그림 3. 월별 등가 가동시간

그림 4는 계측기간 동안 PV시스템의 월별 PR, Lc 그리고 Ls의 정규화 특성을 보여준다. 그림에서 보면 PV시스템은 PR이 0.65~0.82, Lc가 0.11~0.29 그리고 Ls는 0.06~0.08의 변화를 보여준다. 연간평균 PR은 0.73, Lc는 0.21 그리고 Ls는 0.06이다. PV시스템은 Lc가 증가되면서 발전성능이 다소 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이것은 스트링의 불량, 입사각 변동 및 미스매치 등으로 PV어레이의 손실이 증가하다는 것을 나타낸다.

그림 5는 계측기간 동안 일사강도 및 온도 등의 환경 변화시 PV어레이 및 PV시스템의 정규화 출력특성을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 일사강도가 증가할수록 PV어레이의 출력전력은 거의 선형적인 비례관계로 증가되는 것을 알 수 있다.²⁾³⁾⁴⁾ 등가 태양 일조시간이 1에 근접할수록 출력전력의 변화특성이 크다. 이것은 일사강도가 높을수록 PV모듈의 온도가 상승하기 때문에 PV모듈의 효율이 감소되면서 PV어레이 손실이 증가한다는 것을 나타낸다.

STC에서 PV어레이의 정격용량과 출력특성을 예측하여 비교한 결과 0.85정도이다. 이것은 PV시스템의 발전성능에 영향을 미치는 심각한 고장은 없지만 환경변화를 고려하더라도 PV시스템의 발생손실이 크기 때문에 성능감소 혹은 손실요인에 대해서 조사 분석할 필요가 있다.

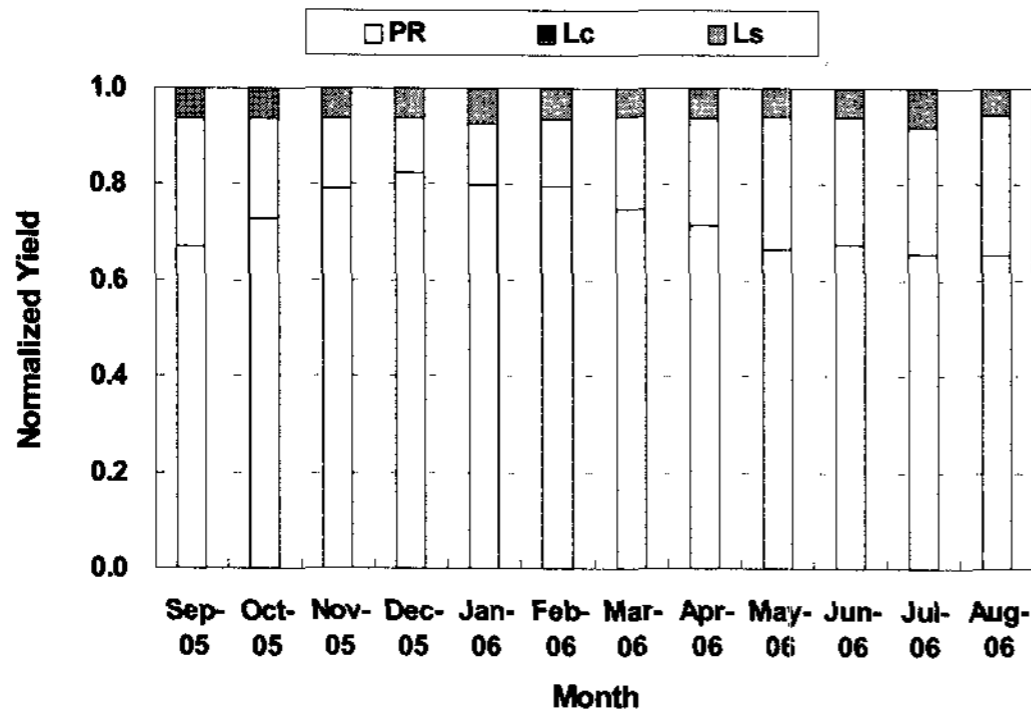


그림 4. PV시스템 월별 성능결과

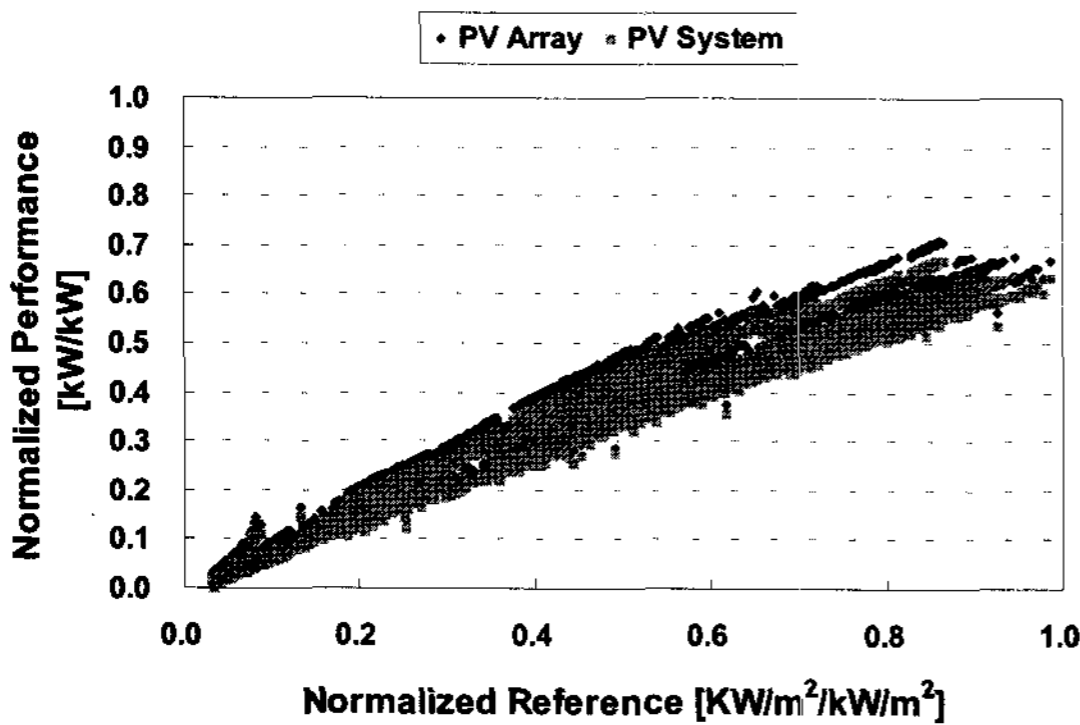


그림 5. PV시스템 정규화 출력특성

용한 예측값의 잔차특성을 비교한 결과 태양 일조 시간에 대해서 PV어레이와 PCS의 출력잔차는 각각 4.8% 그리고 0.4%이하이다. 태양 일조시간 0.2이상에서는 PV어레이 및 PCS의 출력잔차는 각각 3.0% 및 0.3%이하로 비교적 정확하게 예측하였다. 태양 일조시간이 0.2이하에서 PV어레이 및 PCS의 출력잔차가 큰 것은 PV어레이 I-V 특성곡선의 비선형성으로 PV어레이의 성능특성이 급격하게 변화되므로 성능을 정확하게 예측하는 것이 어렵기 때문이다.

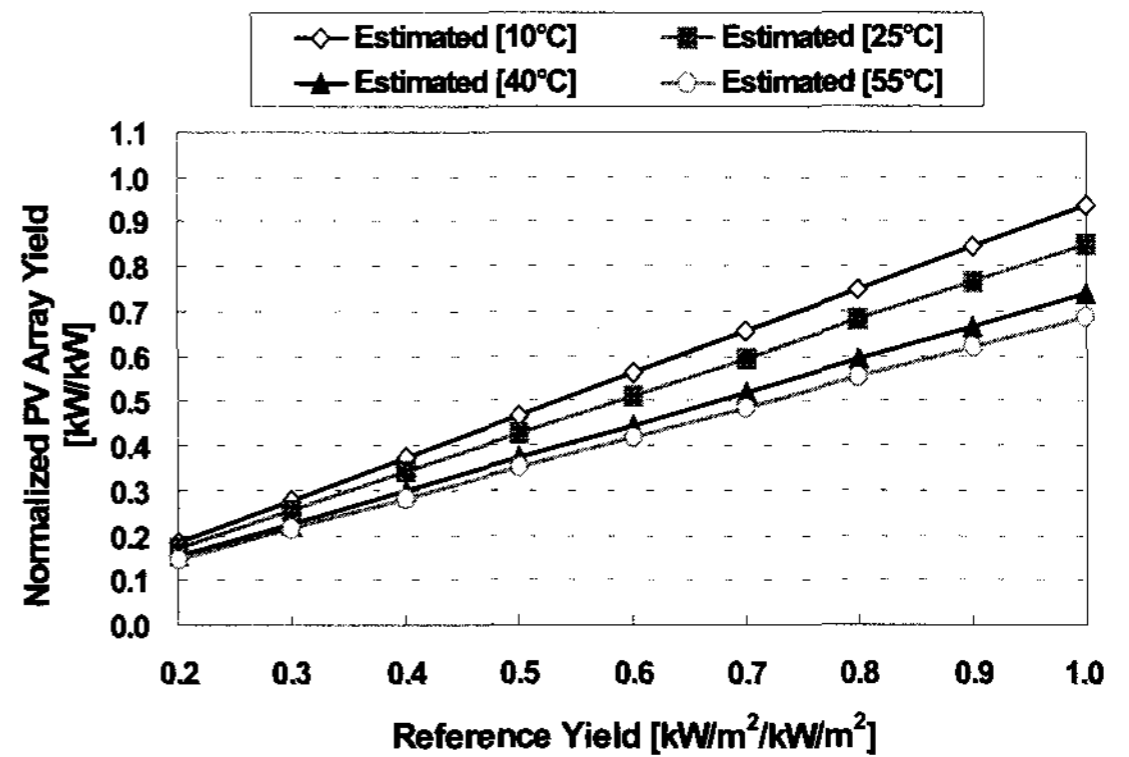


그림 6. PV어레이의 정규화 출력특성

그림 6과 7은 계측기간 동안 수집된 계측데이터를 토대로 온도 변화시 등가 태양 일조시간에 대한 등가 PV어레이의 가동시간과의 관계를 1차 방정식으로 근사화시킨 출력모델을 사용하여 온도변화에 따른 PV어레이의 성능을 예측한 결과와 PCS의 입력전력에 대한 출력전력과의 관계를 2차 비선형회귀방정식으로 근사화시킨 출력모델의 사용하여 PCS의 성능을 평가분석 결과를 보여준다.²⁾ 그림에 보면 PV어레이의 성능은 일사강도에 선형적인 비례관계를 가지고 있으나, 태양 일조시간 0.2이하에서는 PV어레이 I-V 특성곡선의 비선형성으로 태양 일조시간 0.2이상에서의 성능예측 결과와 비교하면 정확성이 떨어진다. STC에서 수집된 계측데이터를 이용하여 실측값과 출력모델을 이

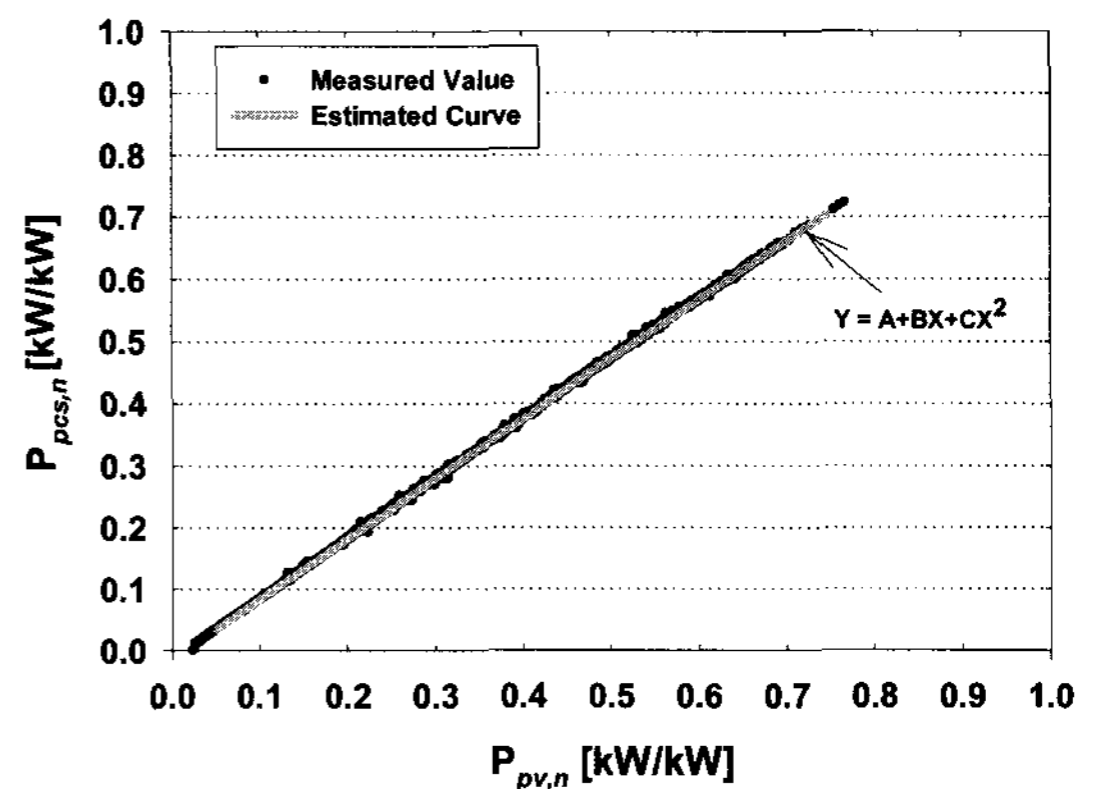


그림 7. PCS의 정규화 출력특성

그림 8은 계측데이터를 사용하여 환경변화에 따른 PV어레이와 PCS의 근사화 출력모델을 사용하

여 PV시스템의 월별 성능을 평가 분석한 결과를 보여준다. 그림에서 보면 계측기간 동안 PV시스템의 월별 PR은 0.65~0.80, Lc는 0.18~0.26 그리고 Ls는 0.05~0.08이다. PV시스템에서 발생하는 PV어레이 손실인 Lc의 주요 손실을 분석하면 입사각 변동에 의한 손실 0.03~0.04, 미스매치 손실은 0.05~0.07, 온도상승에 의한 손실은 0.01~0.09, 직류회로 손실은 0.006~0.009 그리고 기타손실 0.01~0.08이다.

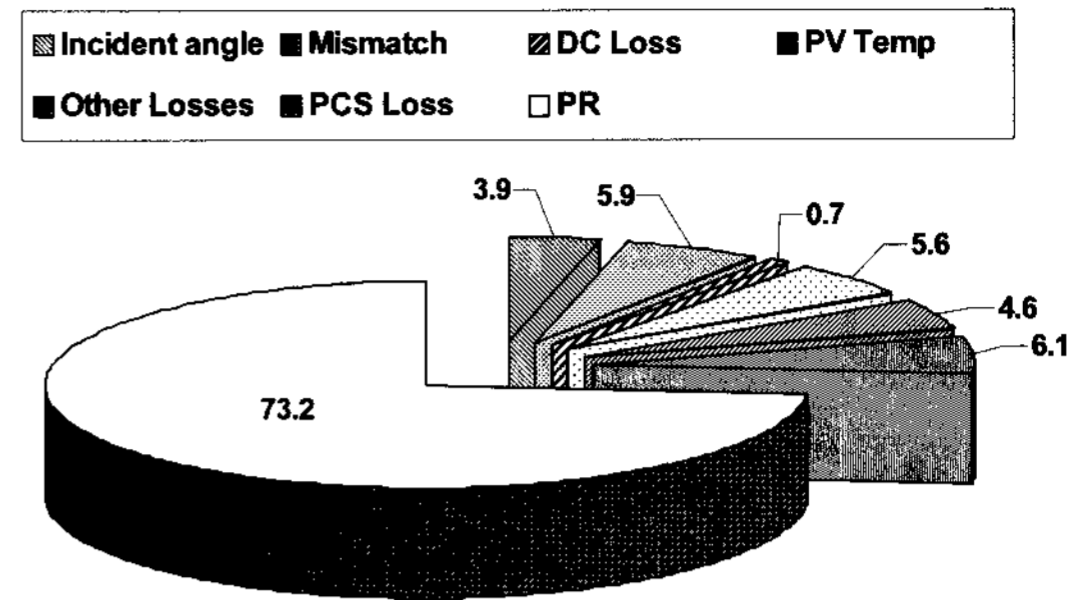


그림 9. PV시스템 평가분석 결과

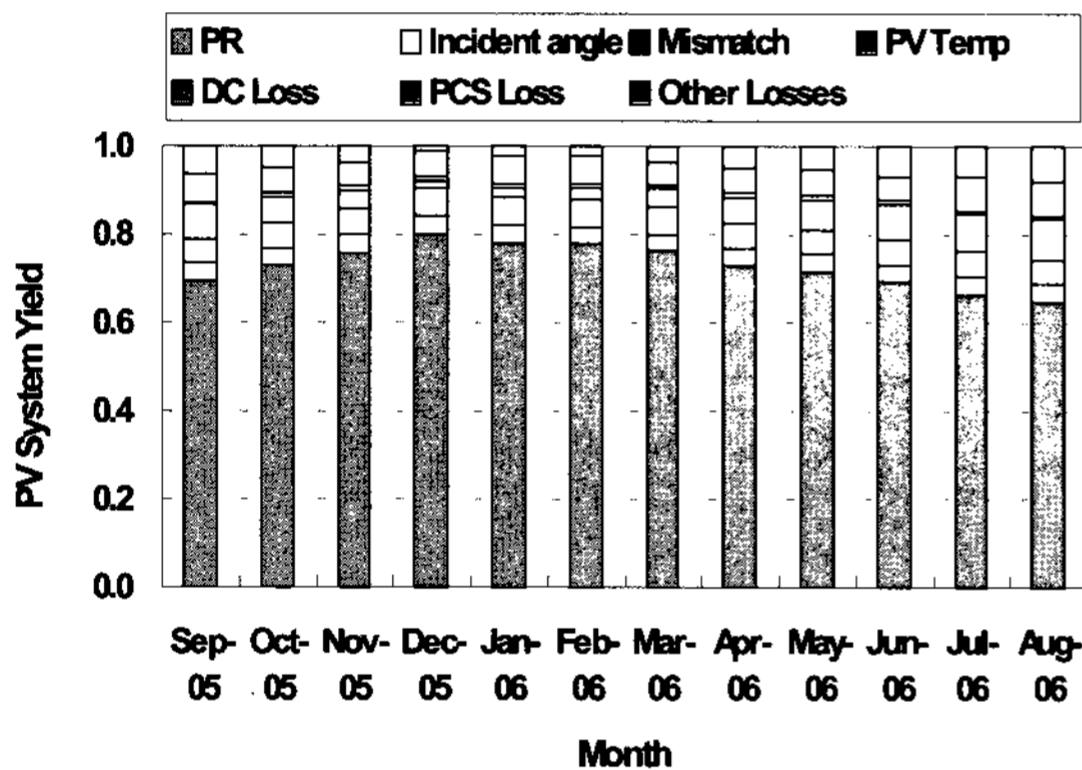


그림 8. PV시스템 월별성능 평가분석

그림 9는 PV시스템의 연간평균 성능 및 손실에 대해서 평가 분석한 결과를 보여준다. PV시스템의 PR은 73.2%, 입사각 변동 손실은 3.9%, 미스매치 손실은 5.9%, 온도상승에 의한 손실 5.6%, 직류회로 손실 0.7%, 기타손실 4.6% 그리고 PCS 손실은 6.1%이다. 설치된 PV시스템은 곡면형으로 설치되어 각 스트링의 경사각이 다르다. 다시 말하면 각 스트링별 등가 태양 일조시간이 다르기 때문에 균일한 성능을 가지지 않는다. 입사각 변동 및 미스매치 등의 PV어레이 손실이 증가하여 전체시스템의 성능이 떨어진다. PV어레이의 설치 경사각이 같다면 75%이상의 성능을 가진다는 것을 PV시스템 성능해석 tool인 SolarPro를 이용한 시뮬레이션 결과에서 예측하였다.

5. 결론

50kW급 계통연계형 PV시스템의 성능특성을 평가분석하기 위해서 감시계측시스템을 설치하였다. 수집된 계측데이터를 이용하여 PV시스템의 성능 및 발생손실에 대해서 정량적인 값으로 평가 분석하여 나타내었고 이 결과에 대해서 종합적으로 검토하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계측기간 동안 수집된 계측데이터를 이용하여 PV어레이, PCS 및 PV시스템의 성능특성을 평가분석하였고 분석결과에 대해서 종합적으로 검토하였다.
- (2) 계측기간 동안 PV시스템의 성능특성을 평가 분석한 결과 PV시스템의 PR은 73.2%이다. 설치된 PV시스템은 곡면형으로 설계되어 각 스트링별 설치 경사각이 다르기 때문에 입사각 변동 및 미스매치에 의한 손실 증가로 전체 PV시스템의 성능이 떨어진다. PV어레이가 동일한 경사각으로 설치된다면 75%이상으로 비교적 양호한 성능을 가진다는 것을 시뮬레이션을 통해서 예측할 수 있다.
- (3) 평가분석 결과를 토대로 중규모이상의 PV시스템은 PR이 75%이하인 경우 PV시스템의 고

장 혹은 이상 등으로 발전성능이 떨어진다는 것을 나타내었다. 따라서 PR이 75% 이상이 될 수 있도록 시스템의 선정부터 설계 시공시에 고려되어야 한다.

PV시스템에서 수집된 계측데이터와 근사화 출력모델을 이용하여 성능특성을 평가분석하였다. 현재까지의 평가분석 방법은 아직까지 정확성 및 유효성을 검증하기에는 다소 부족한 점이 있다. 특히 그늘, 미스매치 및 기타 손실을 평가분석하기 위해서는 많은 계측데이터가 필요하다. 향후에는 설치환경 및 설계시공별 다양한 PV시스템의 계측 데이터를 지속적으로 수집하여 성능데이터베이스를 구축할 계획이다. 구축된 성능데이터베이스를 기반으로 PV시스템의 새로운 핵심응용기술들을 개발하기 위해서 모델설계 및 평가분석 방법의 유효성을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지·자원기술개발사업(2006-N-PV12-P-04)의 연구비 지원으로 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, 정영석, 유권종, 최주엽, 최익, 3kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능특성 평가 분석, 대한전기학회논문지, Vol. 53B, No. 8, 2004, pp. 509-515.
3. T. Oozeki, K. Otani and K. Kurokawa, An evaluation method for PV system to identify system losses by means of utilizing monitoring data, In : Proceedings of 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006, pp. 2319-2322.
4. B. Decker, and U. Jahn, Performance of 170 grid connected PV plants in northern germany analysis of yields and optimization potentials, Solar Energy, Vol. 59, No. 4, 1997, pp. 127-133.