

3kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능특성 평가분석

論 文

53B-8-7

Performance Analysis and Evaluation of 3kW Grid-Connected PV Systems

蘇 楨 訓* · 鄭 永 錫** · 劉 權 鍾** · 崔 宙 燁*** · 崔 翼§,
(Jung-Hun So · Young-Seok Jung · Gwon-Jong-Yu · Ju-Yeop Choi · Ick Choy)

Abstract - The concerns of distributed generations including photovoltaic(PV) system have been increased around the world since PV system is becoming widespread as a clean and gentle energy source for earth. In the future high density grid-connected PV systems will be interconnected with distribution network. As a result, the stability and long-term reliability of PV systems have become more important issues in this area. Grid-connected PV systems have been installed and monitored at field demonstration test center(FDTC) and also data acquisition system(DAS) has been constructed for measuring and analyzing performance of PV system to observe the overall effect of environmental conditions on their operation characteristics. The performance of PV system has been evaluated and analyzed for component perspective (PV array and power conditioning system) and global perspective (system efficiency, capacity factor, and electrical power energy) by field test and loss factors of PV system.

Key Words : Photovoltaic system, PCS(Power conditioning system), MPPT(Maximum power point tracking), PR(Performance ratio),

1. 서 론

화석에너지의 고갈과 국제환경 규제에 따른 미래에너지원의 안정적 공급 및 환경개선의 대응방안으로 태양광발전(PV, Photovoltaic), 풍력발전 등과 같은 분산전원에 대한 정부의 적극적인 지원정책에 힘입어 국내의 이용보급이 가속화됨에 따라 분산전원기술에 대한 연구개발 및 관심이 증가되고 있다.[1][2][7][8] 또한 분산전원의 보급이 확대되면서 향후에는 배전계통으로의 고밀도 연계형 분산전원이 예상됨에 따라 분산전원에 대한 신뢰성과 안정성 등의 실용화기술 확립이 중요한 문제로 대두되고 있다.[1][3][4] 이에 따라 미국, 일본 등의 선진국에서는 실증시험을 수행하여 분산전원에서 발생하는 문제점에 대한 대책기술 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 장기간 운전에 따른 분산전원의 문제점 및 성능특성을 평가 분석하여 시스템의 성능개선을 위한 최적설계기술과 신뢰성 및 안정성 확립을 위한 대책기술 연구는 이제 시작단계라 할 수 있다.[3][4][5][6]

따라서 본 논문에서는 분산전원인 PV시스템 및 구성요소 기기에 대해서 장기간 실증시험에서 발생하는 여러 문제점들과 성능특성을 종합적으로 평가 분석하기 위해서 국내외

에서 제작된 PV시스템과 on-line 감시계측시스템을 태양에너지 실증연구센터(FDTC, Field demonstration test center)에 설치하여 수행하였다. 또한 실증시험에서 수집된 실측 결과를 토대로 PV시스템의 성능특성을 평가분석하여 PV시스템의 장시간 운전시에 발생하는 성능저하 및 손실요인의 문제점들에 대해서 비교 검토하였다.

2. PV시스템 개요

그림 1은 장기간의 실증시험에 의한 PV시스템의 종합적인 성능특성을 평가 분석하기 위해서 FDTC에 설치 운영되고 있는 3kW급 계통연계형 PV시스템을 포함한 전체 시스템의 개요를 보여주고 있다. FDTC에 설치된 PV시스템의 PV어레이는 경사지붕 혹은 평지붕방식으로 설치되었고, 설계발전용량은 3kW~3.3kW 범위이다. PV어레이는 동일한 설치조건 즉 경사각 18°, 방위각 0°(정남향)의 고정방식으로 설계되었고 PV어레이와 PCS(Power conditioning system)는 PV시스템의 설계시공 기준에 준하여 설치되었다.

표 1, 2는 FDTC에 설치하여 실증시험에 사용된 제조업체별 표준조건(STC, Standard test conditions) 즉 일사강도 1000W/m², 모듈온도 25°C 및 AM(Air mass) 1.5 조건에서의 PV모듈과 정격시의 PCS의 규격을 나타내고 있다.[1][2] 실증시험에 따른 PV시스템의 성능특성을 평가분석하기 위해서 기상 및 전기적 성능 측정센서를 사용한 on-line 감시계측시스템을 설치하여 2002년 11월부터 현재까지 장기간 시험에 따른 실측결과들을 수집하고 있으며, 원거리에서도 실시간 감시계측이 가능할 수 있도록 설계 구성하였다.

* 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 博士科程

** 正 會 員 : 韓國에너지技術研究院 太陽光시스템研究센터

*** 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 教授/工博

§ 正 會 員 : 光云大 情報制御工學科 教授/工博

接受日字 : 2004年 4月 2日

最終完了 : 2004年 6月 30日

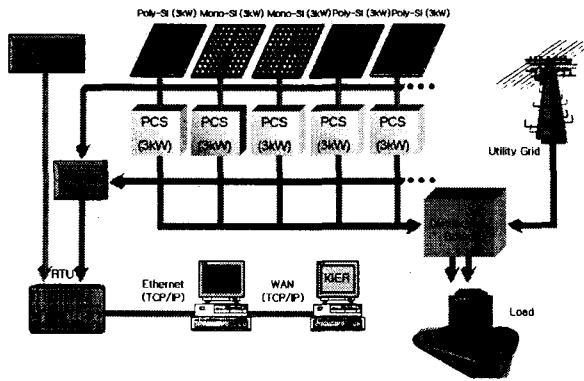


그림 1 전체 시스템 개요
Fig. 1 Total system overview

표 1 PV모듈 규격 (표준조건)
Table 1 PV module specifications(STC)

PV모듈	A	B	C	D
종류	다결정Si	단결정Si	단결정Si	다결정Si
정격출력 [W]	78	53	75	75
단락전류 [A]	4.88	3.35	4.7	4.75
개방전압 [V]	21.54	21.7	21.2	21.8
최대출력전류 [A]	4.46	3.05	4.2	4.35
최대출력전압 [V]	17.21	17.4	17.2	17.3

표 2 PCS 규격(정격시)
Table 2 PCS specifications(under rated conditions)

PCS		A	B
주회로 방식	PCS방식	전압형전류제어	전압형전류제어
제어 방식	전력제어	MPPT	MPPT
	운전제어	자동기동/정지	자동기동/정지
정격	정격입력전압	340 V _{DC}	200 V _{DC}
	운전가능전압	280~430 V _{DC}	200~300 V _{DC}
성능	정격출력	3 kW	4 kW
	변환효율	91% 이상	93.5% 이상
	출력역률	0.98 이상	0.95 이상
	총합전류왜율	3% 이하	5% 이하
보호 기능	계통보호	과전압, 부족전압, 과주파수, 부족주파수	과전압, 부족전압, 과주파수, 부족주파수

3. PV시스템 성능 평가

3.1 PV어레이 성능 평가

국내에 보급된 PV시스템을 FDTC에 설치하여 구성요소 기기인 PCS와 PV모듈의 최적설계기술과 PV시스템 설계시공의 최적화기술 개발을 목적으로 장기간의 실증시험을 수행하여 분석기간 동안 PV시스템의 성능특성을 비교 분석하였다. 그림 2는 분석기간인 2002년 11월~2003년 10월까지 PV시스템별 PV어레이의 월별 출력전력량을 보여주고 있다.

분석기간동안 PV어레이에서 발전된 총 출력전력량은 4.13MWh(system1), 3.51MWh(system2), 3.98MWh(system3), 3.68MWh(system4)이다. 그림 3은 PV시스템별 PV어레이의 월별변환효율 특성을 나타내고 있는데, 분석기간동안 PV어레이는 9.2%~10.1%의 평균변환효율 특성을 보여주고 있다. 그림 2, 3에서 보듯이 1월에 PV어레이의 출력전력량과 변환효율에 급격하게 떨어지는 것은 일사조건이 양호한 상태에서도 기후조건(적설, 온도변화 등)의 영향으로 PV시스템의 운전이 정지되는 경우가 자주 발생하였기 때문이다. 따라서 PV시스템의 가동율이 감소될 뿐만 아니라 PV어레이의 변환효율이 떨어지면서 출력전력량이 감소되었다. 7월의 경우는 PV시스템의 가동율은 40% 이상이나, 기후조건(구름, 강우, 온도변화 등)의 악화에 인해서 발전성능을 결정하는 일일사량의 감소, 저일사강도(200W/m²하)의 증가 및 온도상승으로 인한 PV어레이 손실 증가 등에 의해서 PV어레이의 출력전력량이 기타 월별과 비교해서 감소되는 것을 평가 분석결과에서 알 수 있었다.

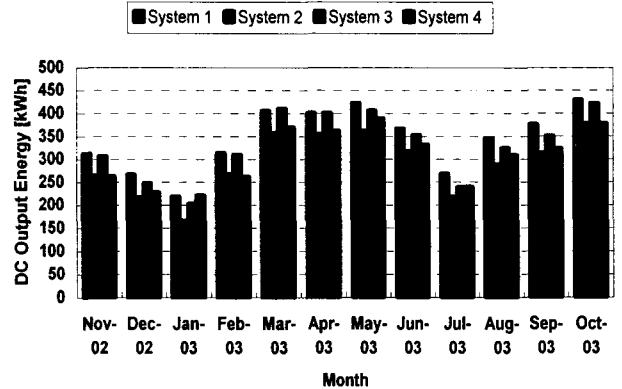


그림 2 월별 PV어레이 출력전력량
Fig. 2 Monthly PV array output energy

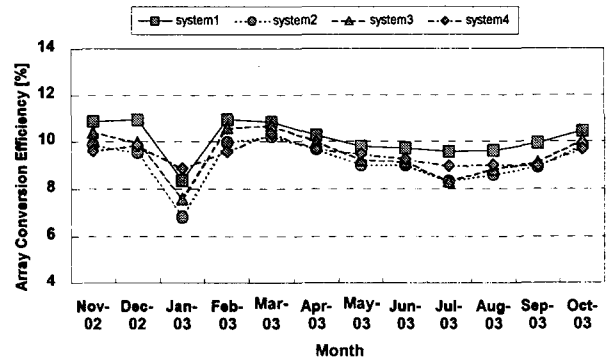


그림 3 월별 PV어레이 변환효율
Fig. 3 Monthly PV array conversion efficiency

3.2 PCS 성능 평가

그림 4는 분석기간동안 FDTC에 설치된 PV시스템별 PCS의 월별 출력전력량을 보여주고 있다. 분석기간동안 PCS에

서 발전된 총 출력전력량은 3.69MWh(system1), 3.02MWh(system2), 3.32MWh(system3), 3.21MWh(system4)이다.

그림 5는 분석기간 동안 PV시스템별 PCS의 월별 가동률 특성을 보여주고 있다. PCS의 연간 평균가동율은 42.8%(system1), 40.6%(system2), 40.4%(system3), 41.6%(system4)으로 실증시험 기간동안 PCS의 결함 혹은 고장으로 장기간 동안 운전이 정지되는 경우는 없다는 것을 알 수 있으며, PCS의 연간 평균변환효율은 각각 88.8%(system1), 85.7%(system2), 83.1%(system3), 86.9%(system4)이다.

PCS(system3)의 변환효율이 다른 시스템과 비교해서 변환효율 특성이 떨어지는 것은 실증시험에 의한 PCS의 실측 성능이 표 2에서 제시한 PCS의 성능을 만족하지 못하고 설계상의 결함이 있다는 것을 나타낸다. 일사강도 300W/m² 이상에서는 모든 PCS의 MPPT(Maximum power point tracking) 제어는 비교적 정확히 동작되었다.

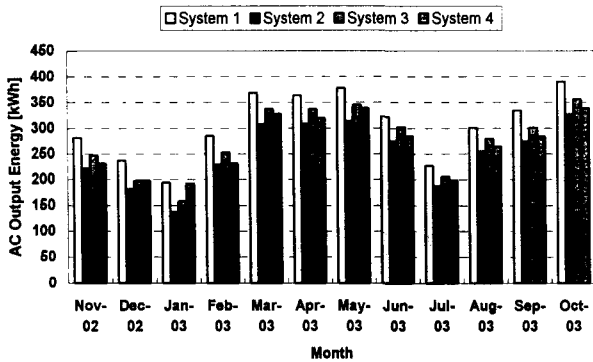


그림 4 월별 PCS 출력전력량
Fig. 4 Monthly PCS output energy

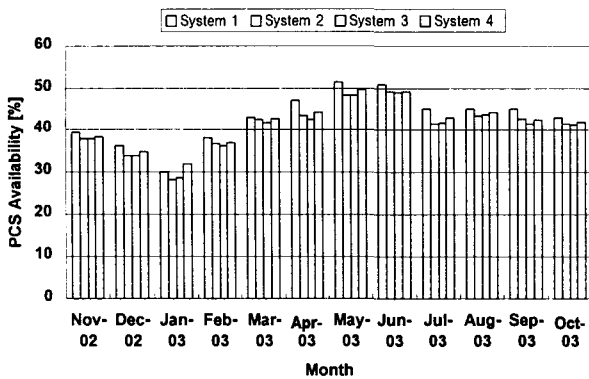


그림 5 월별 PCS 가동율
Fig. 5 Monthly PCS availability

3.3 PV시스템 성능 평가

분석기간동안 FDTC에서 실증시험에 의한 PV시스템의 성능특성을 종합적으로 정리하면 표 3과 같다. 분석기간 동안의 PV시스템 출력전력량과 표준조건에서의 PV어레이 출력전력량에 대한 비인 시스템 이용률은 11.5%~12.8%이

고, PV시스템 출력전력량과 일사량에 따른 PV어레이의 출력전력량에 대한 비인 시스템의 발전효율은 7.9%~9.0%의 분포를 가진다. 표 3에서 보는 바와 같이 PV어레이(system2)의 경우 변환효율이 일사강도 300W/m²이하에서는 PV어레이 I-V특성의 비선형성으로 환경조건 변화에 대해서 변환효율특성이 3%~10%로 변화 범위가 크다. 즉 PV모듈의 성능저하 및 PV어레이의 직병렬불균형에 성능특성의 변화가 크게 되어 일사강도 300W/m²이하에서는 PCS의 MPP의 정확한 추적제어가 어렵다는 것이 실증시험 결과에서 확인할 수 있었으며, 이에 따른 PV어레이의 손실이 증가되면서 설치운전중인 다른 PV시스템보다 발전성능이 떨어짐을 알 수 있었다. PV어레이(system3)는 일사강도 300W/m²이하에서 PV어레이의 변환효율특성이 4%~10%로 변화범위를 보이는데 이것은 환경조건 변화시 PV어레이의 손실이 증가되면서 변환효율특성이 떨어졌기 때문이다. PV어레이(system1, system4)는 전범위 일사강도에 대해서 8%~11%로 비교적 균일한 변환효율특성을 가지고 있지만, PV어레이(system4)의 경우는 경사지붕방식으로 설치되었기 때문에 다른 PV시스템과 비교해서 온도상승에 따른 PV어레이 손실이 증가되면서 발전성능이 다소 나빠졌다. PCS(system3)는 변환효율특성의 저하에 따른 PCS 손실이 증가되면서 발전성능이 떨어지고 일사강도 300W/m²이하 그리고 PV모듈의 환경조건 변화시 PV어레이 I-V특성의 비선형적인 관계로 성능특성의 변화가 크게 일어났다. 따라서 PCS가 MPP를 정확하게 추적 제어하는데 실패할 가능성이 크고 안정성 및 속응성에 영향을 미치면서 이에 따른 소자의 스위칭 손실 등이 증가되면서 PV시스템의 발전성능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

표 3 PV시스템 성능 평가결과
Table 3 performance results of PV system

PV시스템		system1	system2	system3	system4
PV 어레이	설치조건	방위각: 0° 경사각:18°	방위각: 0° 경사각:18°	방위각: 0° 경사각:18°	방위각: 0° 경사각:18°
	설치방식	평지붕	평지붕	평지붕	경사지붕
	어레이구성	14직렬× 3병렬	14직렬 ×3병렬	14직렬× 3병렬	14직렬× 3병렬
	변환효율 [%]	10.1	9.2	9.5	9.5
	출력전력량 [kWh]	4,135	3,510	3,980	3,682
PCS	변환효율 [%]	89.1	86.1	83.5	87.1
	출력전력량 [kWh]	3,686	3,021	3,322	3,213
	가동율 [%]	42.9	40.7	40.5	41.6
시스템	이용률 [%]	12.8	11.5	11.5	12.2
	발전효율 [%]	9.0	7.9	7.9	8.3

4. PV시스템 평가분석

PV시스템은 전일사량과 PV모듈의 온도변화 등의 환경조건의 변화에 따라서 발전성능이 결정된다. 따라서 본 논문에서는 PV시스템의 성능을 평가 분석하여 환경조건변화에 따른 PV어레이 및 PCS의 성능저하 및 손실요인 등의 문제점들을 조사분석 위해서 장기간의 실증시험에서 수집된 실측결과를 이용하여 PV시스템 및 구성요소기인 PV어레이와 PCS 성능특성을 비교 분석하였다.

그림 6, 7은 FDTC에서 수집된 실측결과를 토대로 PV시스템(system1, system3)의 옥외 표준조건 및 PV모듈 표면온도 변화시 일사강도에 대한 PV어레이의 출력특성을 보여준다. PV어레이의 발전성능은 일반적으로 일사강도에 대해서 선형적인 비례관계를 가지고 있으나, 일사강도 200W/m² 이하에서는 비선형성이 증가하기 때문에 일사강도 200W/m² 이상과 비교하였을 경우 출력변화가 크다는 것을 알 수 있다. 그림에서 보면 PV어레이(system1)는 전범위 일사강도에서 표면온도변화에 따른 PV어레이의 변환효율특성이 비교적 일정하고 균일한 출력특성을 가진다. 표면온도 25°C시의 실측성능과 표준조건(STC)에서의 예측성능과 비교하였을 때 계측오차, 환경조건의 변화, PV어레이 손실 등을 고려한다면 발전성능에서 큰 차이는 없다는 것을 알 수 있다.

PV시스템(system3)의 경우 일사강도 300W/m²이하에서 PV어레이 I-V특성이 PV어레이(system1)와 비교해서 발전성능이 떨어지지만, 일사강도가 300W/m²이상에서는 변환효율 및 출력전력이 비교적 균일한 성능특성을 가짐을 알 수 있는데, 여기서 표면온도 25°C시의 실측성능과 표준상태(STC)에서의 예측성능과 비교하였을 때 발전성능의 잔차가 큰 것은 PV모듈 성능저하, 환경조건 변화에 따른 PV어레이의 손실 증가로 인해서 발전성능이 떨어졌기 때문이다.

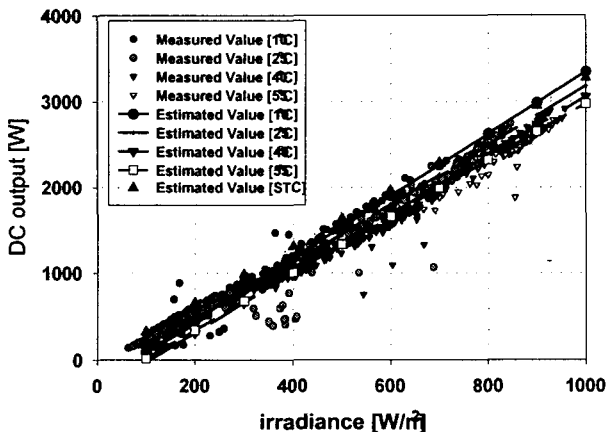


그림 6 PV모듈 온도변화에 대한 PV어레이 성능(system1)
Fig. 6 PV array performance for PV module temperature (system1)

환경조건의 변화에 대한 PV시스템별 PV어레이의 발전성능과 성능저하 및 손실요인 등의 문제점들을 평가분석하기 위해서 PV시스템의 모듈표면온도에 대한 일사강도와 PV어

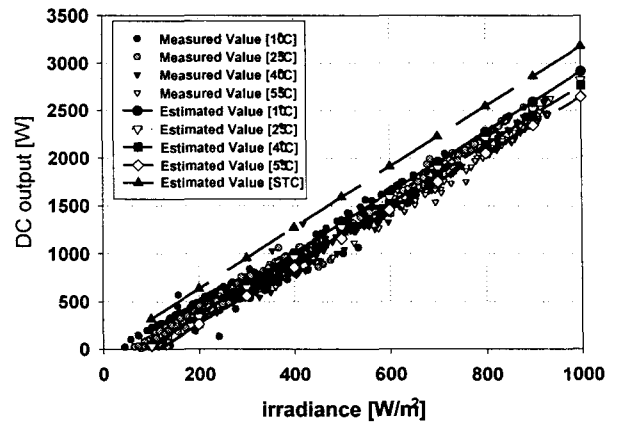


그림 7 PV모듈 온도변화에 따른 PV어레이 성능(system3)
Fig. 7 PV array performance for PV module temperature (system3)

레이의 출력특성과의 관계를 FDTC에서 수집된 실측결과를 사용하여 식(1)과 같이 1차 선형회귀방정식으로 근사화하였다.[2][3][5]

$$P_{PV} = B_0 * G_A + B_1 \tag{1}$$

여기서 P_{PV} 는 PV어레이의 출력전력, G_A 는 일사강도, B_0 , B_1 는 선형회귀계수를 나타낸다. PV어레이의 실측치와 예측치의 잔차는 식(2)와 같다.

$$R_{PV} = \frac{(P_{PV, Meas} - P_{PV, Est})}{P_{PV, Meas}} \tag{2}$$

여기서 R_{PV} 는 PV어레이의 실측치과 예측치의 잔차, $P_{PV, meas}$, $P_{PV, est}$ 는 각각 PV어레이 실측치과 예측치를 나타낸다.

식(1), (2)를 사용하여 표면온도 25°C일 경우, 일사강도에 대한 PV시스템별 PV어레이의 회귀계수 및 출력특성을 계산하여 표 4와 같이 정리하였다. 표 4에서 보면 근사화된 회귀방정식에서 일사강도 200W/m²이하에서 PV시스템 실측치와 예측치의 잔차가 큰 것은 계측오차 뿐만 아니라 PV어레이 I-V특성이 환경조건의 변화에 대해서 비선형적인 특성을 가지기 때문에 정확하게 PV어레이의 발전성능을 예측하기가 어렵다. 일사강도 200W/m² 이상에서는 실측치와 예측치의 잔차가 0.3%~3.2% 정도로 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그림 8, 9는 PV시스템(system1, system3)의 PCS 변환효율특성을 보여주고 있다. FDTC에 설치된 모든 PCS는 MPP 추적제어와 자동기동/정지기능이 있어 일사강도가 80~100W/m²일 경우 자동기동을 시작하여 계통으로 전력을 공급하기 시작하고 일사강도가 약 70~80W/m² 이하로 떨어질 경우, PCS는 자동 정지된다. PCS의 입력전력이 500W이상일 경우 PCS의 변환효율은 일정한 특성을 유지하지만 PCS의 입력전력 500W 이하에서는 일사강도에 따른 변환효율특성의 변화가 크다는 것을 분석결과에서 알 수 있었다. PCS의 입력전력이 500W이하에서는 PV어레이의 비선형적

인 출력특성으로 PCS의 MPPT제어가 어렵고 이 제어가 정확하게 수행하지 못한다면 MPPT 제어에 따른 손실이 증가하여 PCS의 변환효율특성의 변화가 크게 되었다.

그림에서 보면 PV시스템(system1)의 경우 PV어레이의 변환효율특성이 전범위 일사강도에서 변화범위가 적고 균일한 특성을 가지면서 PCS가 안정적인고 양호한 성능특성을 가진다. PCS(system3)의 경우 입력전력이 500W이하에서는 PV어레이의 성능특성의 변화가 상당히 크게 되어 PCS가 MPPT의 정확한 제어가 어렵고 추적제어에 따른 PCS 손실이 증가되면서 스위칭 소자를 포함한 구성요소기기의 안정성 및 신뢰성 등에 문제점이 발생할 수 있다. 그리고 PCS의 구성요소기기인 리액터, 변압기 등의 선정 및 설계에 문제가 있어 전범위 동작영역에서 PCS의 변환효율이 표 2에서 제시된 규격의 변환효율보다 3%~9%정도 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

표 4 PV시스템별 PV어레이 성능

Table 4 PV array performance results of each PV system

PV 어레이		system1			system2		
회귀 계수	B ₀	-269.0			-279.5		
	B ₁	3.449			3.1		
구분 (25°C)	실측치 [kW]	예측치 [kW]	편차 [%]	실측치 [kW]	예측치 [kW]	편차 [%]	
일사 강도	200W/m ²	0.523	0.421	19.6	0.391	0.341	12.9
	400W/m ²	1.120	1.111	0.8	0.956	0.961	0.4
	600W/m ²	1.745	1.800	3.2	1.545	1.580	2.3
	800W/m ²	2.497	2.490	0.3	2.240	2.200	1.8
PV 어레이		system3			system4		
회귀 계수	B ₀	-354.7			-228.5		
	B ₁	3.652			3.065		
구분 (25°C)	실측치 [kW]	예측치 [kW]	편차 [%]	실측치 [kW]	예측치 [kW]	편차 [%]	
일사 강도	200W/m ²	0.462	0.375	18.7	0.485	0.384	20.9
	400W/m ²	1.032	1.106	7.2	1.002	0.997	0.5
	600W/m ²	1.794	1.836	2.4	1.574	1.610	2.3
	800W/m ²	2.614	2.567	1.8	2.215	2.223	0.4

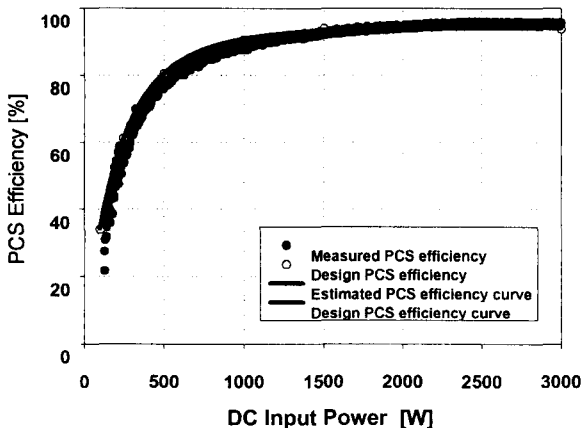


그림 8 PCS 변환효율(system1)

Fig. 8 PCS efficiency(system1)

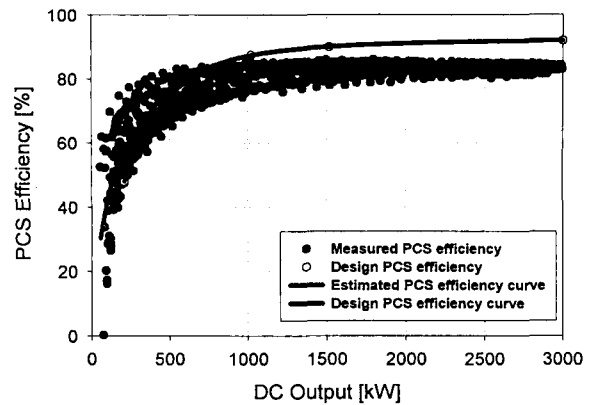


그림 9 PCS 변환효율(system3)

Fig. 9 PCS efficiency(system3)

PV시스템별 PCS의 발전성능 및 문제점들을 평가분석하기 위해서 PCS 입력전력에 대한 변환효율과의 관계를 FDTC에서 수집된 실측결과를 사용하여 비선형 회귀방정식으로 근사화하여 비교 분석하였다. PCS의 효율특성을 근사화한 비선형 회귀방정식은 식(3)과 같다.

$$\eta_{PCS} = Y_0 + A * (1 - e^{-B * P_{IN}}) + C * (1 - e^{-D * P_{IN}}) \quad (3)$$

여기서 η_{PCS} 는 PCS의 변환효율, P_{IN} 은 PCS의 입력전력, Y_0, A, B, C 및 D 는 각각 회귀방정식의 회귀계수를 나타낸다. PCS의 실측효율과 예측효율의 잔차식은 식(4)와 같다.

$$R_{\eta_{PCS}} = \frac{(\eta_{PCS, meas} - \eta_{PCS, esti})}{\eta_{PCS, meas}} \quad (4)$$

여기서 $R_{\eta_{PCS}}$ 는 PCS의 실측효율과 예측효율의 잔차, $\eta_{PCS, meas}$, $\eta_{PCS, esti}$ 는 각각 PCS의 실측효율과 회귀모델을 사용한 예측효율을 나타낸다.

식(3), (4)를 적용하여 일사강도에 대한 PV시스템별 PCS의 회귀계수 및 변환효율특성을 계산하여 정리하면 표 5와 같다. 표에서 보는 바와 같이 PCS(system1, system4)는 일사강도에 따라서 잔차가 1.6%이하로 PCS의 발전성능을 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 그러나 PCS(system2, system3)의 경우는 일사강도 200W/m²에서 실측효율과 예측효율과의 잔차가 매우 크다는 것을 알 수 있는데, 이것은 표에서 보듯이 PV시스템(system2, system3)의 PCS는 환경조건 변화시 일사강도 200W/m²이하에서 PV어레이 I-V특성이 급격하게 변화되어 PCS가 MPPT 제어를 정확하게 수행하지 못하기 때문이다. 그러나 200W/m²이상에서는 PCS의 잔차가 0.4%~4.3%로 다소의 차이가 있지만 PWM 및 MPPT 제어 등은 비교적 정확히 동작되는 것을 알 수 있었다.

실증시험에서 수집된 실측결과를 이용하여 PV시스템의 구성요소기기 즉, PV모듈, PV어레이 및 PCS 등의 발전성능을 회귀방정식으로 근사화시켜 모델링한다면 시뮬레이션을 통해서 환경조건 변화시 PV시스템의 성능특성을 보다 정확하게 예측 분석하여 이에 따른 PV시스템의 손실요인

및 발생되는 문제점 등을 미리 파악할 수 있으므로 PV시스템의 성능개선을 위한 최적설계기술, 운전시 발생되는 문제점들에 대한 대책기술들을 확립할 수 있을 것이다.

표 5 PV시스템별 PCS 성능

Table 5 PCS performance results of each PV system

PCS		System1			System2		
회귀 계수	Y ₀	12.01			9.03		
	A	80.67			50.36		
	B	0.003			0.004		
	C	0			3.85		
	D	0			0.0007		
구분 (25°C)		실측 효율 [%]	예측 효율 [%]	잔차 [%]	실측 효율 [%]	예측 효율 [%]	잔차 [%]
일사 강도	200W/m ²	77.5	77.3	0.2	84.4	72.3	14.3
	400W/m ²	90.0	91.4	1.6	83.6	84.5	1.1
	600W/m ²	93.5	93.8	0.4	87.2	87.5	0.4
	800W/m ²	95.4	94.2	1.3	89.4	89.4	0.8
PCS		System3			System4		
회귀 계수	Y ₀	6.75			0		
	A	27.84			80.61		
	B	0.0025			0.0036		
	C	28.96			23.15		
	D	0.01			0.0002		
구분 (25°C)		실측 효율 [%]	예측 효율 [%]	잔차 [%]	실측 효율 [%]	예측 효율 [%]	잔차 [%]
일사 강도	200W/m ²	81.7	71.4	12.6	73.3	73.7	0.6
	400W/m ²	84.3	80.7	4.3	87.5	88.5	1.2
	600W/m ²	83.7	83.1	0.7	91.4	92.6	1.2
	800W/m ²	83.8	83.5	0.4	93.5	94.4	1.0

PV시스템의 성능특성, 손실요인 및 발생되는 문제점 등을 정확히 평가분석하기 위해서 표 6과 같이 분석기간인 2002년 11월~2003년 10월까지 수집된 실측결과를 분석하여 표준조건(STC)에서 일사강도에 대한 PV어레이와 PCS의 실측치와 설계치를 비교 분석하였다. 표에서 보면 PV시스템별 PV어레이와 PCS의 발전성능의 잔차는 일사강도에 대해서 4.5%~38.5%, 0.3%~7.9% 범위를 가진다. PCS와 비교해서 PV어레이의 잔차가 큰 것은 계측오차, 환경조건변화, PV모듈 성능저하 등의 발전성능에 영향을 미치는 손실요인이 많기 때문이다. PV어레이(system2)의 발전성능이 다른 PV시스템과 비교해서 잔차가 큰 것은 PV모듈의 성능저하 및 PV어레이의 직병렬 불균형에 따른 손실의 증가로 인해서 PV어레이의 발전성능이 떨어지는 것을 알 수 있었다. PV어레이(system3)는 일사강도 400W/m²이하에서 잔차가 크게 되는 것은 일사강도 400W/m²이하에서는 PV모듈의 성능특성이 균일하지 않고 변화되어 PV어레이의 온도상승에 따른 손실, 직병렬 불균형 및 직류손실 등의 PV어레이의 손실이 증가되기 때문이다. PCS의 발전성능은 일사강도가 증가하여 정격에 도달할수록 잔차가 감소되지만 PCS (system3)은 반대로 잔차가 증가되는 것을 알 수 있었다. 이것은 PCS(system3)의 PWM 및 MPPT 제어 등의 제어기술보다는 리액터, 변압기 등의 구성요소기기의 선정 및 설계시

최적화에 문제가 발생하여 이에 따른 손실의 증가로 PCS의 발전성능이 떨어지기 때문이다. 따라서 PCS 구성요소기기의 최적설계 및 two-mode MPPT 제어를 적용한다면 PV시스템(system3)의 발전성능이 개선될 수 있을 것이다.[7][8]

표 6 PV시스템별 성능결과

Table 6 Performance results of each PV system

구분		System1			System2		
표면온도 25°C	일사강도 [W/m ²]	설계치 [W]	실측치 [W]	잔차 [%]	설계치 [W]	실측치 [W]	잔차 [%]
PV 어레이	200	654	523	19.9	636	391	38.5
	400	1,308	1,120	14.4	1,272	956	24.8
	600	1,962	1,745	11.1	1,908	1,545	19.0
	800	2,616	2,497	4.5	2,544	2,240	11.9
PCS	200	540	406	5.1	510	334	5.2
	400	1,213	1,008	2.7	1,133	799	5.5
	600	1,840	1,631	0.3	1,734	1,347	3.7
	800	2,462	2,384	1.3	2,330	2,002	2.2
구분		System3			System4		
표면온도 25°C	일사강도 [W/m ²]	설계치 [W]	실측치 [W]	잔차 [%]	설계치 [W]	실측치 [W]	잔차 [%]
PV 어레이	200	660	462	29.9	600	486	19.0
	400	1320	1,032	21.8	1,200	1,002	16.5
	600	1980	1,794	9.4	1,800	1,574	12.5
	800	2640	2,504	5.1	2,400	2,215	7.7
PCS	200	534	378	0.8	475	356	5.8
	400	1,179	871	5.0	1,064	877	1.2
	600	1,802	1,502	7.3	1,633	1,440	0.7
	800	2,421	2,190	7.9	2,196	2,071	2.0

PV시스템은 그림자영향, PCS손실, MPPT 미스매칭, PV어레이의 온도상승 등의 손실요인에 따라서 발전성능이 결정이므로 최적화 설계를 위해서는 PV시스템의 손실요인에 대한 정확한 평가분석이 필요하지만 평가분석에는 많은 시간과 실측결과들이 필요하다. 따라서 PV시스템의 손실요인 및 문제점을 비교적 정확하고 신속하게 평가 분석할 수 있는 PR(Performance ratio)를 사용하여 분석기간동안 PV시스템의 성능특성을 평가 분석하였다.[4][5] PR은 PV시스템의 손실요인 뿐만 아니라 PV시스템의 구성요소기기와 전체 시스템의 성능을 평가 분석하는데 있어 중요한 분석항목이다. PR은 표준상태(STC)에서 손실요인을 고려하지 않은 PV시스템의 이상적인 발전성능과 실제 발전성능에 대한 비로 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$PR = (E_{PV} \times G_{STC}) / (P_{PV, nom} \times H_A) \quad (5)$$

여기서 PR은 성능계수, E_{PV}는 시스템 출력전력량, P_{PV,nom}은 표준조건(STC)에서 공칭출력전력, G_A는 전일사량 그리고 G_{STC}는 표준조건(STC)에서 일사강도 1000W/m²를 나타내고 있다.

식(5)을 이용하여 산출한 PV시스템별 월별 PR특성은 그림 10과 같다. 분석기간 동안 PV시스템별 PR은 75.1%(system1), 63.3%(system2), 67.3%(system3), 71.8%(system4)의 특

성을 가진다. 일반적으로 PR > 80%인 경우는 PV시스템은 양호한 발전성능을 가지고, PR < 70%인 경우는 PV시스템이 고장 혹은 결함 등의 여러 문제점이 발생하여 PV시스템의 발전성능이 떨어진다는 것을 의미한다.

그림 11은 장기간의 실증시험을 수행하여 분석기간 동안 PV시스템의 성능계수 PR, Lc(Capture losses), Ls(System losses)을 분석한 결과를 보여주고 있다.[4][5] 그림에서 보는바와 같이 PV시스템의 구성요소기인 PCS와 PV모듈이 규격에서 제시한 설계파라미터를 이용하여 시뮬레이션한 결과 PR이 76.8%~78.1%로 양호한 발전성능을 갖지만, 실측 결과를 토대로 분석한 결과는 PR이 63.3%~75.1%, Lc(PV어레이 손실)가 15.7~26.5%, Ls(PCS손실)가 9.2%~13.3%로 PV시스템(system1, system2)의 발전성능이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이것은 PR(system2)의 경우 PR이 63.3%로 Ls 보다는 Lc(PV모듈 성능저하, 직·병렬접속의 불균형 및 온도상승에 따른 손실 등)에 의해서 PV어레이의 손실이 증가되었고, PV시스템(system3)의 경우 PR(system3)이 67.3%로 Lc 보다는 Ls 즉 PCS 구성요소기인 변압기, 리액터 등의 최적 선정 및 설계의 문제에 따른 PCS손실이 증가하여 PCS의 발전성능이 표 6에서 제시한 설계치의 발전성능과 비교해서 PCS의 변환효율특성이 약 7%정도 떨어지기 때문에 PV시스템의 발전성능이 나빠졌다. 따라서 PCS(system3)의 실제성능이 표에서 제시한 규격의 성능과 같다면 근사화된 PV시스템 구성요소기기의 회귀모델을 적용하여 시뮬레이션을 수행하면 PR이 0.71정도로 비교적 양호한 발전성능을 가진다는 것을 알 수 있었다.

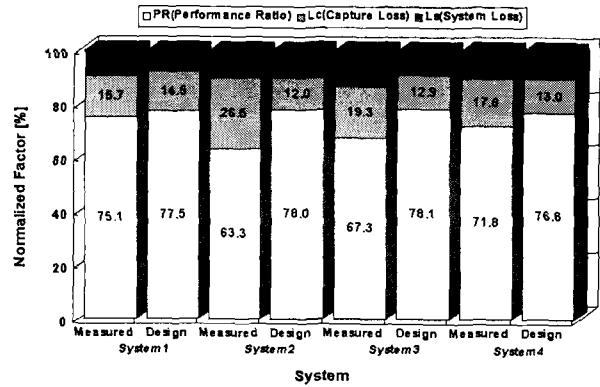


그림 11 PV시스템 성능평가결과
Fig. 11 An evaluation results of PV system performance

되었기 때문에 PV시스템의 발전성능이 떨어졌다. PV시스템(system3)의 경우는 PV어레이 손실보다는 PCS 손실 즉 PCS의 구성요소기인 리액터와 변압기 등의 선정 및 설계시 최적화에 문제가 있어 PCS의 변환효율이 전범위 동작영역에서 규격에서 제시된 변환효율보다 3%~9%정도 떨어지면서 PCS 손실이 5%정도 증가되었기 때문에 PV시스템의 발전성능이 떨어졌다. PCS(system3)의 실제성능이 규격에서 제시한 성능과 같을 경우, PR이 0.71정도로 PV시스템이 비교적 양호한 성능을 가진다는 것을 시뮬레이션을 통해서 예측하였다. 또한 PV시스템(system2, system3)의 구성요소기인 PCS와 PV모듈의 실제 성능이 제시된 규격과 같은 성능을 가진다면 PV시스템의 발전성능이 15%이상 개선될 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 이러한 분석결과를 토대로 향후에는 PV시스템의 성능개선, 신뢰성 및 안정성 등의 실용화기술들을 확립하기 위해서 성능특성 및 문제점을 보다 정확하게 진단할 수 있는 평가분석기법을 개발하고 PV시스템의 계통연계시의 문제점에 대한 대책기술과 최적설계기술에 대한 연구를 수행할 계획이다.

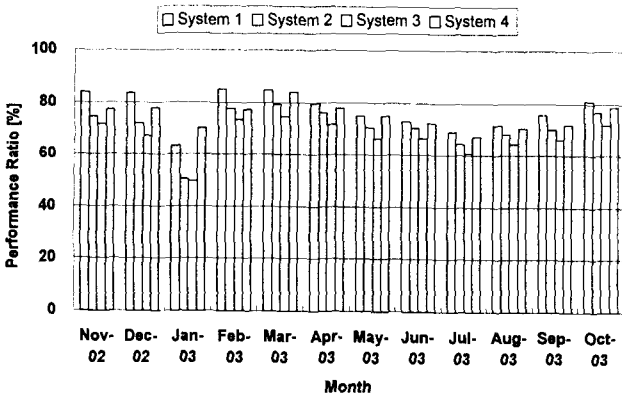


그림 10 월별 PV시스템 PR
Fig. 10 Monthly PV system performance ratio

5. 결 론

본 논문에서는 국내에 설치 보급된 3kW급 계통연계형 PV시스템과 on-line 감시계측시스템을 태양에너지 실증연구센터(FDTC)에 설치 운영하여 장기간의 실증시험결과를 토대로 PV시스템의 성능특성과 운전시 발생하는 성능저하와 손실요인 등의 문제점을 진단하기 위해서 평가분석을 통해서 PV시스템별로 비교 검토하였다. 그 결과 PV시스템(system2)의 경우는 PCS 손실보다는 PV모듈 성능저하, 직·병렬접속의 불균형 등으로 PV어레이 손실이 14%정도 증가

감사의 글

본 연구는 2003년도 에너지기술학술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] T. Sugiura, T. Yamada, H. Nakamura, M. Umeya, K. Sakutam, and K. Kurokawa, "Measurements, analyses and evaluation of residential PV systems by Japanese monitoring program," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 75, Issues 3-4, 1 pp. 767-779, 2003.

[2] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, R. Hagihara, and M. Watanabe, "Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature," *Solar Energy Materials & Solar Cells*.

Volume 75, Issues 3-4, 1 pp. 665-671, 2003.

- [3] M. Sidrach-de-Cardona and LI. Mora Lopez, "Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system," Energy, Vol. 24, Issues 2, pp. 93-102, 1999.
- [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. 4-6, pp. 127-133, 1997.
- [5] Imad Abouzahr, and R. Ramakumar, "An approach to assess the performance of utility-interactive photovoltaic systems," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 2, pp. 145-153, 1993.
- [6] T. Erge, V. U. Hoffmann, and K. Kiefer, "The german experience with grid-connected PV systems," Solar Energy, Vol. 70, No. 6, pp. 479-487, 2001.
- [7] 소정훈, 유권중, 최주엽, "시뮬레이션에 의한 PV시스템 설치방식의 최적설계에 관한 연구," 한국태양에너지학회 논문지, Vol. 23, No. 3, 2003.
- [8] 유권중, 정영석, 김기현, 최주엽, "저일사강도에서 MPP T를 동작시키기 위한 알고리즘 연구," 대한전기학회 논문지, Vol. 51B, NO. 3, 2002. Vol. 59, No. 4-6, pp. 127-133, 1997.

저 자 소 개

소정훈 (蘇 楨 訓)



1970년 5월 4일생. 1994년 영남대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 광운대 대학원 전기공학과 박사과정. 1996년~현재 한국에너지기술연구원 태양광시스템 연구센터 연구원

Tel : 042-860-3371, Fax : 042-860-3739

E-mail : jhso@kier.re.kr

정영석 (鄭 永 錫)



1970년 12월 9일생. 1994년 충북대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 박사과정 재학. 1996년~현재 한국에너지기술연구원 태양광시스템 연구센터 연구원

Tel : 042-860-3068

E-mail : jung96@kier.re.kr

유권중 (劉 權 鍾)

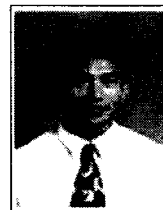


1954년 8월 5일생. 1982년 조선대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1985년 일본 KOBE대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989년~1989년 일본 Fuji전기(주) 종합연구소 주임연구원. 1990년~현재 한국에너지기술연구원 태양광시스템 연구센터 센터장

Tel : 042-860-3417

E-mail : y-gj@kier.re.kr

최주엽 (崔 宙 燁)

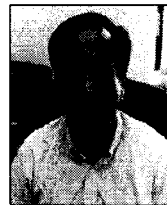


1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1990년 Texas Univ. at Arlington 졸업(석사). 1994년 Virginia Tech. Electrical Eng. 졸업(공학). 1994년~1995년 Virginia Tech. Post Doc. 1995년~1999년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 선임연구원. 2000년~현재 광운대 전기공학과 조교수

Tel : 02-940-5143

E-mail : juyeop@daisy.kwangwoon.ac.kr

최익 (崔 翼)



1956년 6월 5일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년~2003년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 2003년~현재 광운대 정보제어공학과 교수

Tel : 02-940-5157

E-mail : ickchoy@kw.ac.kr