

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 24, No. 2, 2004

3kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 성능특성 비교분석에 관한 연구

소정훈*, 최주엽*, 유권종**, 정영석***, 최재호***

*광운대학교 전기공학과(jhso@kier.re.kr), (juyeop@daisy.gwu.ac.kr),

**한국에너지기술연구원(y-gj@kier.re.kr),

***충북대학교 전기공학과(jung96@kier.re.kr), (choi@power.chungbuk.ac.kr)

A Study on Performance Analysis of 3kW Grid-Connected PV Systems

So, Jung-Hun*, Choi, Ju-Yeop*, Yu, Gwon-Jong**, Jung, Young-Seok***, Choi, Jae-Ho***

*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(jhso@kier.re.kr), (juyeop@daisy.gwu.ac.kr)

**Korea Institute of Energy Research(y-gj@kier.re.kr),

***Dept. of Electrical Eng., Chungbuk National University(jung96@kier.re.kr), (choi@power.chungbuk.ac.kr)

Abstract

3kW grid connected PV(photovoltaic) systems have been constructed for evaluating and analyzing performance of PV system at FDTC(field demonstration test center) in Korea. PV systems installed in FDTC have been operating and monitored since November 2002. As climatic and irradiation conditions have been varied through long-term field test, data acquisition system has been constructed for measuring performance of PV system to observe the overall effect of environmental conditions on their operation characteristics. The performance of PV systems 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. By the results, it is very important to develop optimal design technology of grid connected PV system.

Keywords : PCS(Power conditioning system), PV(Photovoltaic), PR(Performance ratio), 계통연계(Grid-connected), MPPT(Maximum power point tracking)

기 호 설 명

- PR : 성능계수
- E_{PCS} : PCS 출력전력량(kWh)
- G_{STC} : 표준조건 일사강도(kW/m^2)
- $P_{PV,nom}$: 표준조건 공칭출력전력(kW)
- G_A : 전일사량 (kWh/m^2)

1. 서 론

태양광발전을 포함한 분산전원은 깨끗하고 오염이 없는 무한정의 미래에너지원으로 전력수요의 증가에 따른 에너지원의 안정적 공급과 지구환경문제에의 대응방안으로 전세계적으로 이용보급이 확대되고 있다. 또한 분산전원기술에 대한 연구개발과 관심이 증가되면서 분산전원의 장기간의 운전에 따른 신뢰성과 안정성 기술의 확립이 중요한 문제로 대두되고 있다.¹⁾²⁾ 미국, 일본 등의 선진국에서는 이러한 문제점에 대한 대책기술 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 실증시험에 의한 분산전원의 성능특성과 문제점을 분석하여 이에 대한 대책기술 연구는 이제 시작단계라 할 수 있다.³⁾⁴⁾⁵⁾

따라서, 본 논문에서는 분산전원인 PV시스템의 실증시험에서 발생하는 PV시스템 및 구성요소기기의 성능특성과 문제점을 비교 분석하기 위해서 3kW급 계통연계형 PV시스템과 on-line 감시계측시스템을 실증연구센터 (FDTC, Field demonstration test center)에 설치 운영하였다.³⁾⁴⁾ 또한 실증시험에서 수집된 실측결과를 토대로 PV시스템 및 구성요소기기의 종합적인 성능특성을 비교 분석하여 최적설계기술 개발을 위해서 장시간 운전에서 발생하는 손실요인과 문제점들에 대해서 검토하였다.

2. 시스템 개요

그림 1은 장기간 실증시험에 따른 환경조건의 변화시에 PV시스템의 종합적인 성능특성을 비교 분

석하기 위해서 FDTC에 설치 운전되어 있는 계통연계형 PV시스템을 포함한 전체시스템의 개요를 보여주고 있다. 설치된 PV시스템의 PV어레이는 경사지붕 및 평지붕 방식으로 설치되었고, 설계발전용량은 3kW~3.3kW 범위이다. PV어레이는 동일한 설치조건 즉 경사각도 18°, 방위각 0°(정남향)의 고정방식으로 설계되었고 PV어레이와 PCS (Power conditioning system)는 설계시공 기준에 준하여 설치되었다. 표 1은 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.

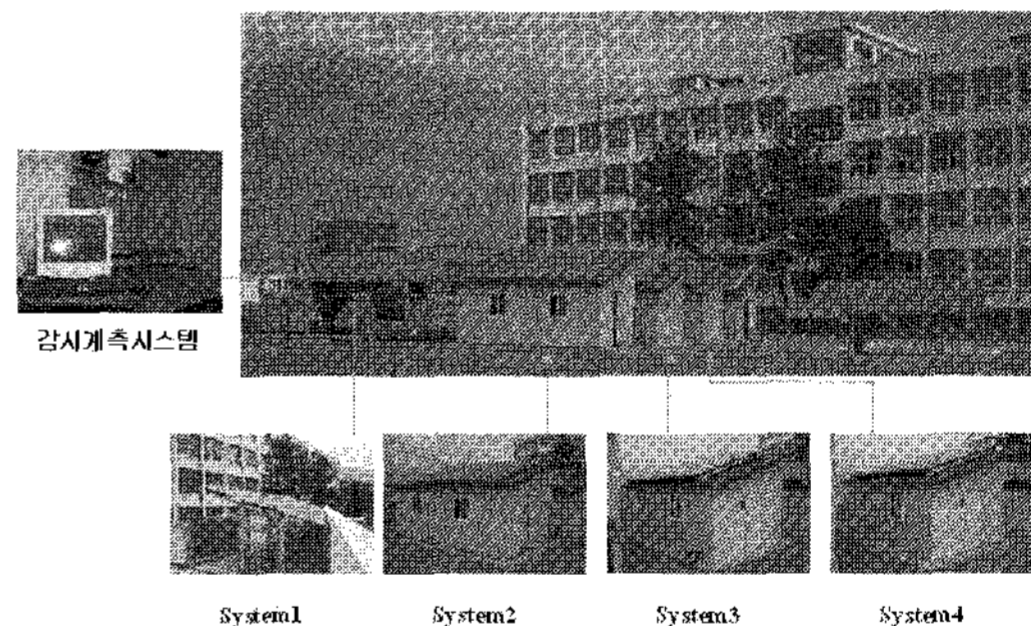


그림 1 전체 시스템 개요도(FDTC)

표 1 PV모듈 및 PCS 규격

PV모듈	A사	B사	C사	D사
P _{MAX} (W)	78	53	75	75
셀종류(Si)	다결정	단결정	단결정	다결정
어레이구성	14×3	20×3	22×2	20×3
PCS	A사	B사	C사	
정격입력전압(V _{DC})	200	255	340	
운전동작전압범위 [V _{DC}]	145~345	200~300	280~430	
정격출력(kW)	4	3	3	
변환효율(정격시)	93.5%이상	90%이상	91%이상	
총압전류 왜율	5%이하	5%이하	3%이하	
각차전류 왜율	3%이하	3%이하	2%이하	

장시간의 실증시험을 통해 PV시스템의 성능특성을 비교 분석하기 위해서 기상관측센서와 전기적 성능측정센서를 사용한 감시계측시스템을 설치 운영하여 실측데이터를 수집하였다. PV시스템은 2002년 11월부터 현재까지 실측데이터를 수집하고 있으며, 원거리에서도 실시간 감시계측이 가능하도록 설계 구성되었다. PV시스템의 성능특성을 비교 분석하기 위해서 표 2와 같이 운전데이터의 측정항목을 선정하여 분석에 필요한 실측데이터를 수집하였다.

표 2 운전데이터 측정항목

	측정항목	단위		측정항목	단위
1	수평면 일사강도	W/m ²	8	PCS 출력전압	V
2	경사면 일사강도	W/m ²	9	PCS 출력전류	A
3	외기온도	oC	10	PCS 출력전력	kW
4	모듈표면온도	oC	11	PCS 출력주파수	Hz
5	어레이 출력전압	V	12	수전 전력	kW
6	어레이 출력전류	A	13	부하 전력	kW
7	어레이 출력전력	kW			

3. 시스템 성능분석

3.1 PV어레이 성능

국내에 보급되어 운전중인 PV시스템을 FDTC에 설치하여 장기간의 실증시험을 수행하여 PCS와 PV모듈의 성능개선을 위한 최적설계기술 개발을 목적으로 PV시스템의 성능특성을 비교 분석하였다. 그림 2은 분석기간인 2002년 11월~2003년 10월까지 PV시스템별 PV어레이의 월별 출력전력량을 보여준다. 분석기간동안 PV어레이에서 발전된 총 출력전력량은 4.13MWh(system1), 3.51MWh (system2), 3.98MWh(system3), 3.68MWh (system4)이다. 그림 3는 PV시스템별 PV어레이의 월별 변환효율의 특성을 보여준다. 분석기간동안 PV시스템별 PV어레이의 평균변환효율은 9.2%~10.1%의 특성을 가진다. 그림 2,

3에서 보듯이 1월에 PV어레이의 출력전력량과 변환효율이 급격하게 떨어지는 것은 기상조건(적설, 온도변화 등)의 영향으로 일사조건이 양호한 상태에서도 PV시스템의 운전이 정지되는 경우가 자주 발생하였기 때문이다. 7월의 경우는 PV시스템의 가동율은 40% 이상이나, 기상조건(구름, 강우 및 온도변화 등)의 악화에 인해 발전성능을 결정하는 전일사량의 감소, 온도상승으로 인한 PV어레이 손실 증가 등에 의해서 출력전력량이 다른 월별과 비교해서 감소되는 것을 분석결과에서 알 수 있었다.

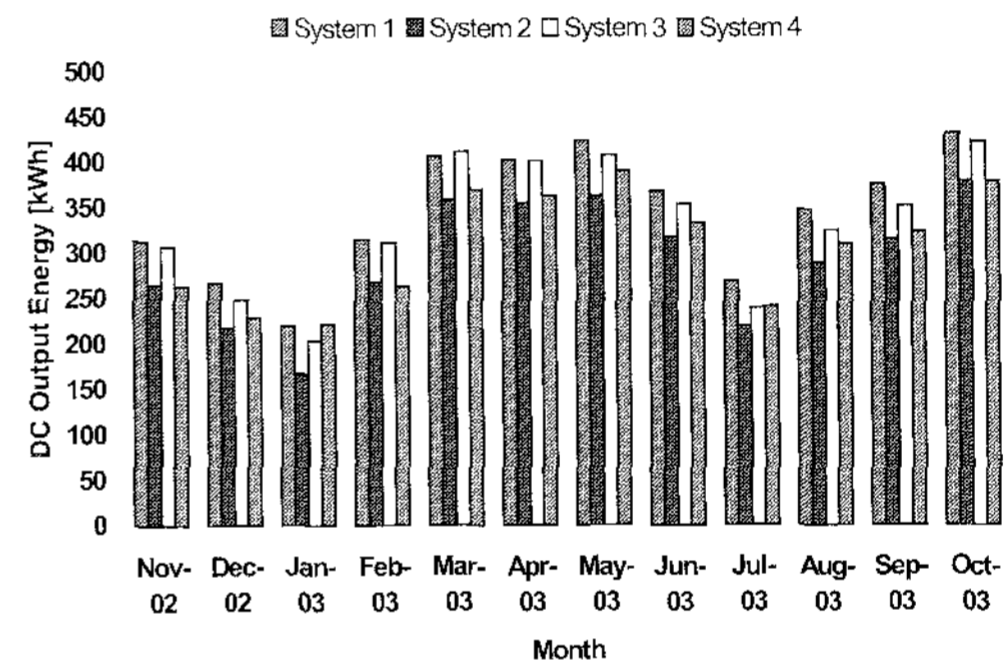


그림 2 PV어레이 월별 출력전력량

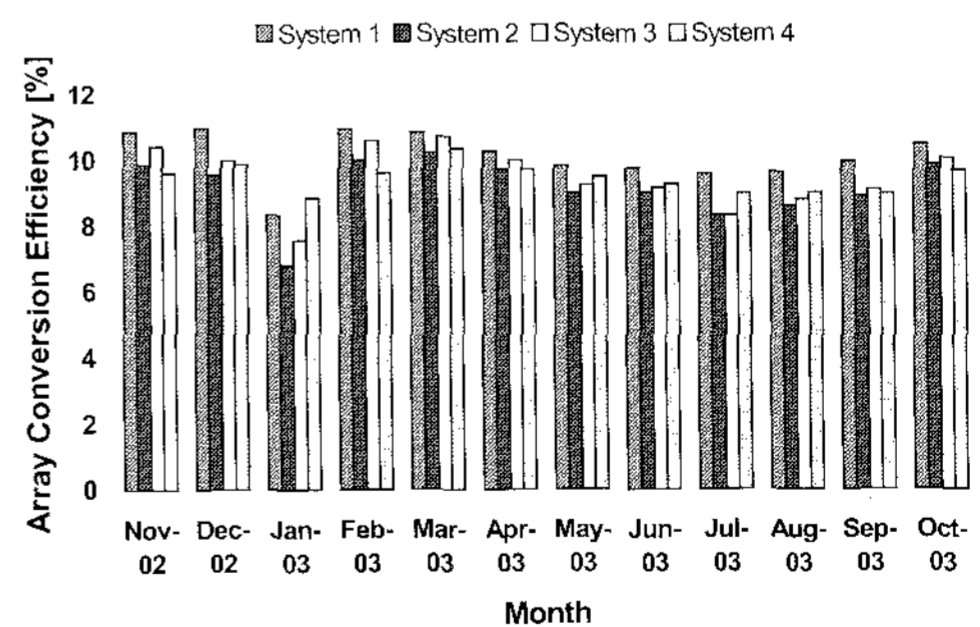


그림 3 PV어레이 월별 변환효율

PV어레이(system2)의 경우 변환효율이 일사강도 300W/m²이하에서는 PV어레이 I-V특성의 비선형성으로 인해서 환경조건 변화에 따라 변환효율

특성이 3%~10%로 변화범위가 크다. 즉 PV모듈의 성능저하로 PV어레이 구성시 직병렬 불균형에 따른 성능특성의 변화가 크게 되어 이에 따른 PV어레이 손실이 증가되었기 때문에 다른 PV시스템보다 발전성능이 떨어짐을 알 수 있었다. PV어레이(system3)는 일사강도 300W/m²이하에서 PV어레이의 변환효율특성이 4%~10%의 변화범위를 가진다. 이것은 환경조건 변화시 PV어레이 손실이 증가되면서 변환효율특성이 떨어진다는 것이다.

PV어레이(system1, system4)는 전범위 일사강도에 대해서 8%~11%로 비교적 균일한 변환효율특성을 가지고 있지만, PV어레이(system4)경우는 경사지붕방식으로 설치되었기 때문에 다른 PV시스템과 비교해서 온도상승에 따른 손실이 증가되면서 발전성능이 다소 떨어졌다.

3.2 PCS 성능

FDTC에 설치된 PCS는 MPPT(Maximum power point tracking) 제어, 자동기동/정지기능을 모두 내장하고 있어 일사강도 80W/m²~100W/m²일 경우 PCS가 자동기동을 시작하여 계통으로 전력을 공급하기 시작하고 일사강도 70W/m²이하로 떨어질 경우 PCS는 자동으로 운전이 정지된다. 일사강도 200W/m²이상일 경우 PCS의 변환효율은 입력전력에 대해서 일정한 성능특성을 유지하지만, 일사강도 200W/m²이하에서는 일사강도에 따른 변환효율특성의 변화가 다소 크다는 것을 분석결과에서 알 수 있었다. 일사강도 200 W/m²이하에서는 PV어레이의 비선형적인 출력특성으로 PCS의 MPPT 제어가 어렵고 정확하게 수행하지 못한다면 MPPT 제어에 따른 손실이 증가하여 PCS의 변환효율특성의 변화가 크게 되어 PCS의 발전성능이 떨어진다.

그림 4, 5는 분석기간동안 PV시스템별 PCS의 월별 평균변환효율과 가동율을 보여준다. 분석기간동안 PCS의 연간 평균변환효율은 각각 88.8%(system1), 85.7%(system2), 3.1%(system3),

86.9%(system4)이다. PCS의 연간 평균가동율은 42.8%(system1), 40.6%(system2), 40.4%(system3), 41.6%(system4)으로 실증시험 기간 동안 PCS의 결함 혹은 고장으로 장기간 운전이 정지되는 경우는 없다는 것을 알 수 있었다.

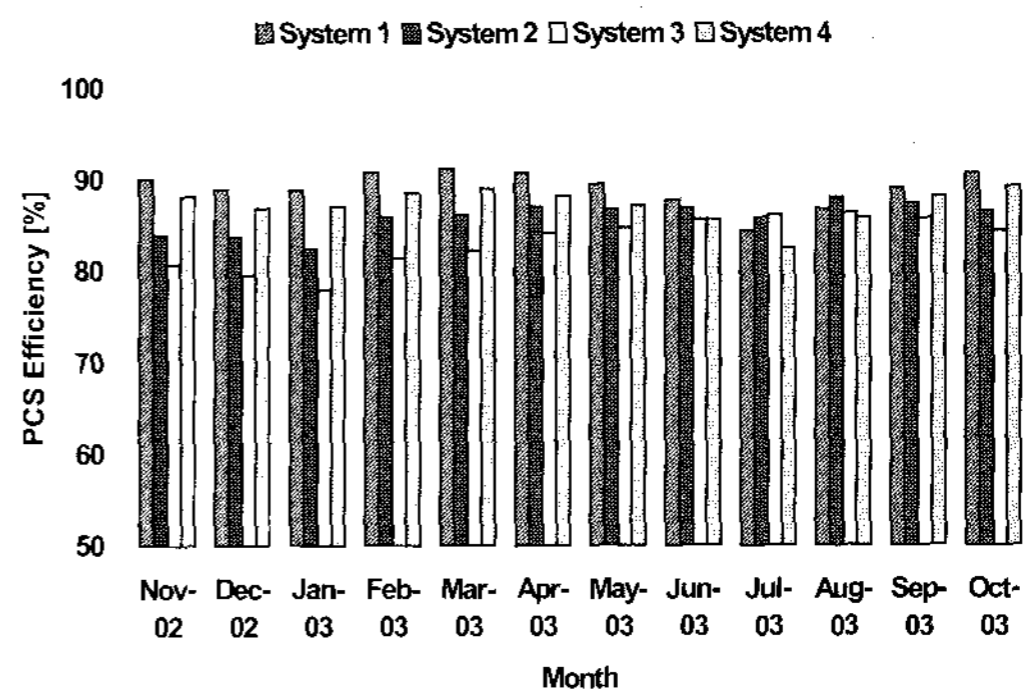


그림 4 PCS 월별 변환효율

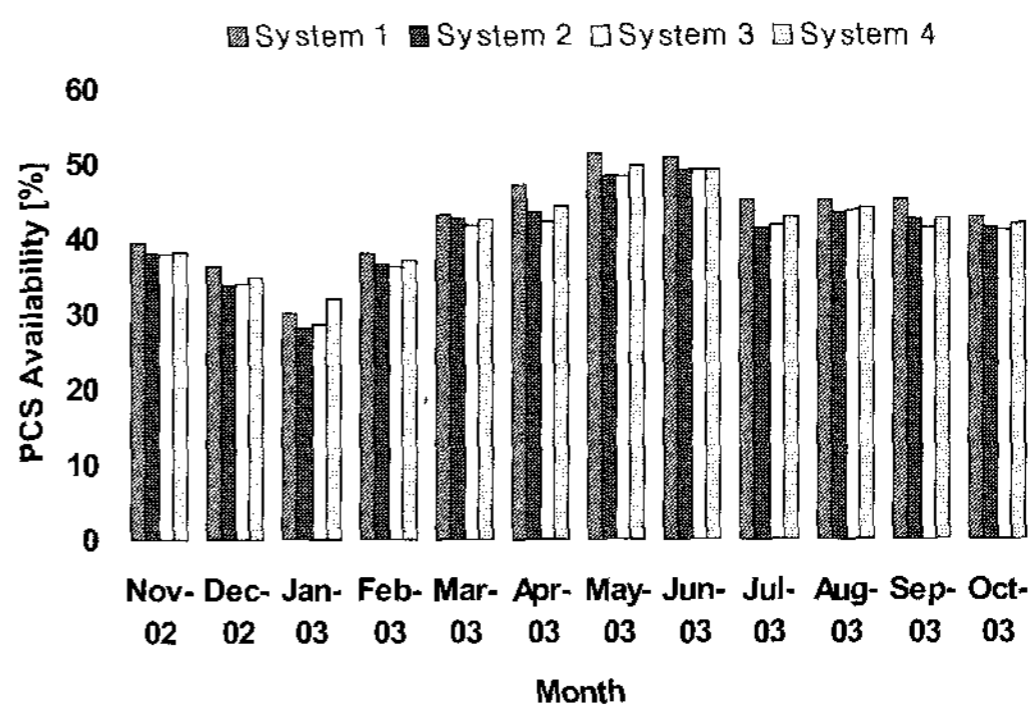


그림 5 PCS 월별 가동율

PCS(system3)의 변환효율이 다른 시스템과 비교해서 떨어지는 것은 PV어레이의 성능저하도 있지만 PCS의 실측성능이 표 1에서 제시한 규격의 PCS 성능을 만족하지 못하고 PCS의 구성요소기기의 선정 및 응용기술 등의 설계상의 결함이 있다는 것을 나타낸다. 일사강도 300W/m²이하 그리고 PV모듈의 환경조건 변화시 PV어레이 I-V특성

의 비선형적인 관계로 성능특성의 변화가 크게 일어났다. 따라서 PCS가 MPP를 정확하게 추적 제어하는데 실패할 가능성이 크고 안정성 및 속응성에 영향을 미치면서 이에 따른 소자의 스위칭 손실이 증가되면서 PV시스템의 발전성능이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 일사강도 300 W/m^2 이상에서는 모든 PCS의 MPP 추적제어는 비교적 정확히 동작되는 것을 분석결과에서 알 수 있었다.

3.3 PV시스템 성능

그림 6은 분석기간동안 PV시스템별 발전효율 및 시스템이용률 특성을 보여준다. 분석기간동안 PV시스템의 발전효율은 각각 9.0%(system1), 7.9%(system2), 7.9%(system3), 8.3%(system4)이고, 시스템이용률은 12.8%(system1), 11.5%(system2), 11.5% (system3), 12.2%(system4)의 특성범위를 가진다.

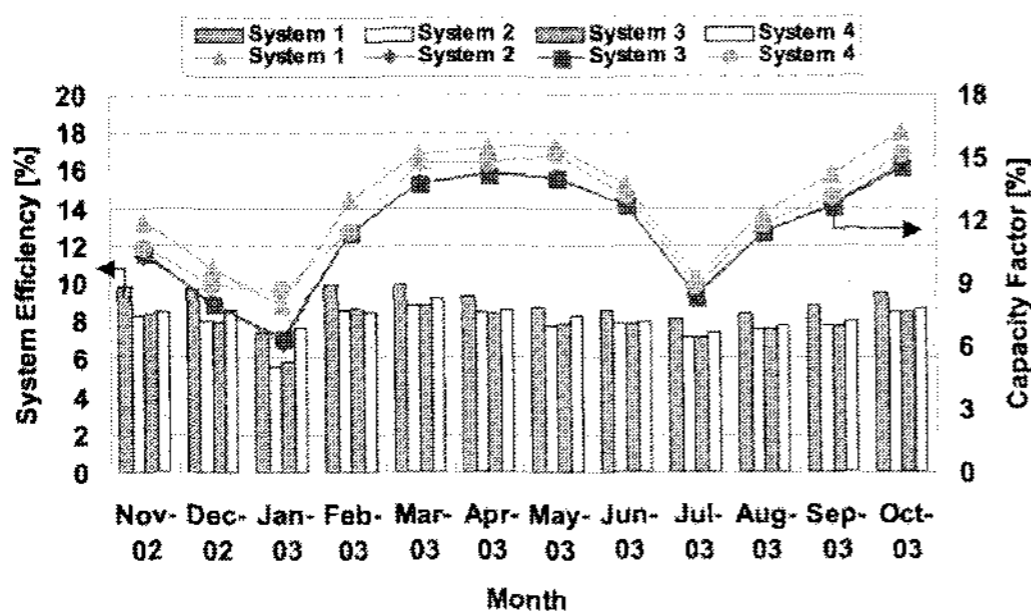


그림 6 PV시스템 월별 발전효율 및 시스템이용률

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 분

석기간동안 PV시스템의 성능특성을 평가 분석하였다.⁵⁾⁶⁾ 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(1)과 같이 정의하였다.

$$PR = (E_{PCS} \times G_{STC}) / (P_{PV,nom} \times G_A) \dots\dots (1)$$

여기서 PR은 성능계수, E_{PCS} 는 PCS 출력전력량, $P_{PV,nom}$ 은 표준조건(STC)에서 공칭출력전력, G_A 는 전일사량 그리고 G_{STC} 는 표준조건(STC)에서 일사강도 1000 W/m^2 를 나타내고 있다.

그림 7은 식(1)을 이용하여 산출한 PV시스템별 월별 PR특성을 보여준다. 분석기간 동안 PV시스템별 PR은 75.1%(system1), 63.3% (system2), 67.3%(system3), 71.8% (system4)의 특성을 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.⁶⁾ 따라서, 장시간의 실증시험을 수행해서 분석기간동안 PV시스템의 PR, L_c (Capture loss), L_s (System loss)을 분석하면 PR은 63.3%~75.1%, L_c (PV어레이 손실)은

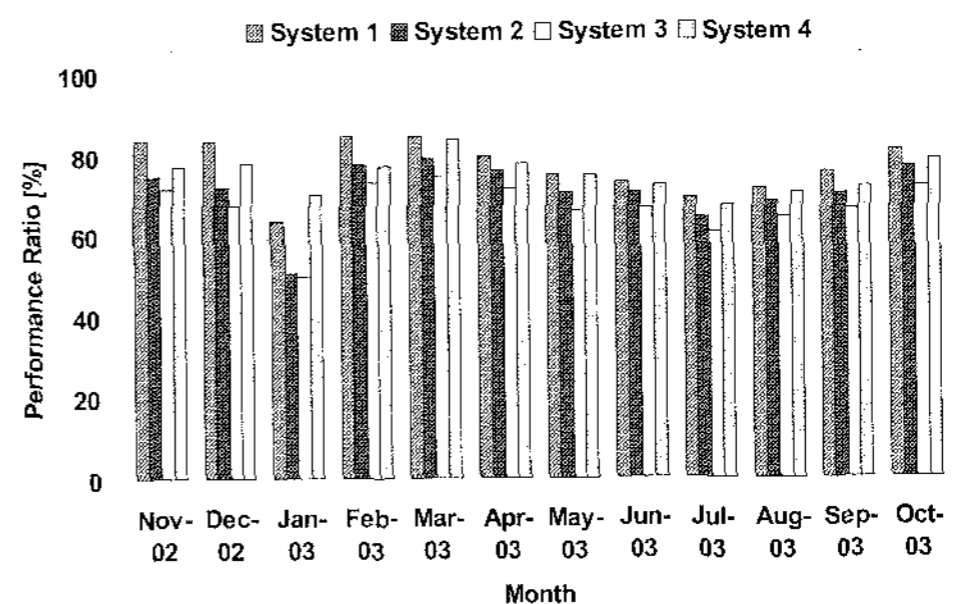


그림 7 PV시스템 월별 성능계수(PR)

15.7~26.5%, Ls(PCS손실)는 9.2%~13.3%를 가진다. PR(system2)이 63.3%로 Ls 보다는 Lc 즉 PV어레이 손실(그림자 영향, PV모듈 성능저하, 온도상승에 따른 손실 등)에 의해서 발전성능이 떨어졌고 PR(system3)은 67.3%로 Lc 보다는 Ls 즉 PCS 손실의 증가 즉 리액터, 변압기 등의 설계 및 선정에 있어 최적화가 이루어지지 않았기 때문에 이에 따른 PCS손실 증가로 발전성능이 떨어졌다. 따라서 PCS(system3)의 실측성능이 표에서 제시한 설계치 성능과 같다면 근사화된 PV시스템 구성요소기기의 회귀모델을 적용하여 시뮬레이션을 수행하면 PR이 0.71정도로 비교적 양호한 발전성능을 가진다는 것을 알 수 있었다.

실증시험에서 수집된 장기간의 실측결과와 PV시스템별 구성요소기기의 시스템 파라미터를 이용하여 PV시스템의 발전성능을 시뮬레이션하여 비교 분석하였다.⁷⁾ 그림 8은 PV시스템별 실측성능과 시뮬레이션에 의한 설계치 성능을 비교 분석한 결과를 보여준다. PV시스템(system2, system3) 구성요소기기의 실측성능이 표 1에서 제시한 규격의 성능과 같다면 그림과 같이 발전성능이 15% 이상 개선될 수 있을 것이다.

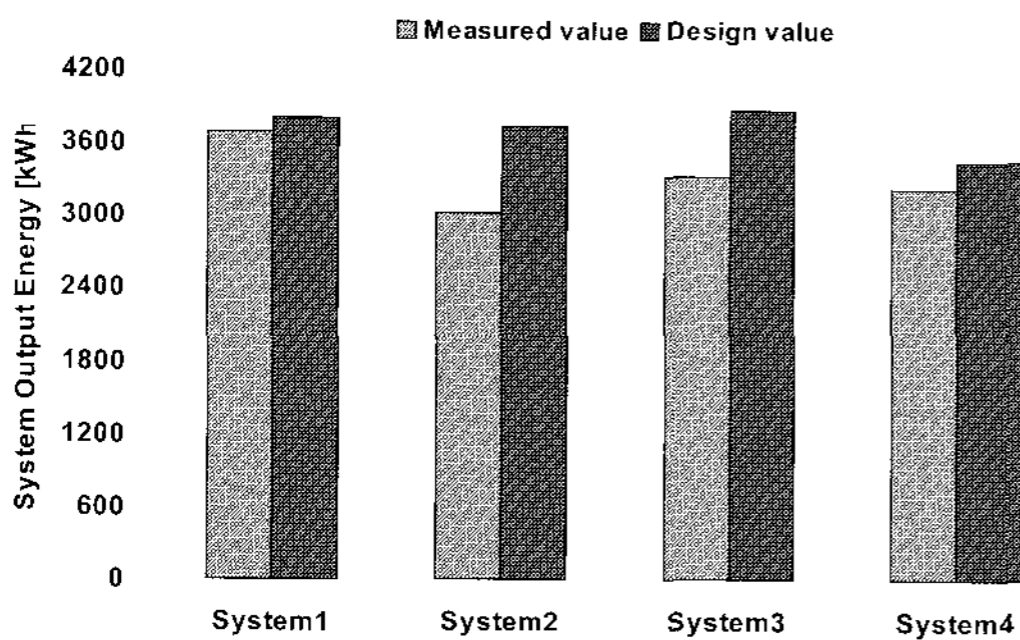


그림 8 PV시스템별 발전성능 비교

4. 결론

국내에 보급되어 운전되고 있는 계통연계형 PV

시스템과 감시제측시스템을 태양에너지 실증연구센터(FDTC)에 설치하여 장기간의 실증시험을 통해서 수집된 실측결과들을 이용하여 PV시스템의 성능특성을 비교 분석함으로써 PV시스템의 성능특성과 문제점에 대해서 검토하였다. 본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 장기간의 실증시험을 수행하여 PV시스템별 구성요소기기인 PV어레이, PCS와 전체시스템의 성능특성을 비교 분석하였다.
- (2) 실증시험에서 수집된 실측결과들을 분석한 결과, PV시스템(system1, system4)의 구성요소기기 즉 PCS와 PV모듈은 규격에서 제시한 설계치 성능과 거의 같은 성능특성을 가지고 있으며, 장기간 운전시 PV시스템에 고장 혹은 결함이 발생되지 않고 정상적으로 운전되는 것을 알 수 있었다. PV시스템(system2)의 경우 PCS 손실보다는 PV모듈 성능저하, 직병렬접속의 불균형 등으로 인해 PV어레이 손실이 14%정도 증가되면서 PV시스템의 발전성능이 떨어지게 되었다. PV시스템(system3)의 경우는 PV어레이 손실보다는 PCS 손실 즉, PCS 구성요소기기인 리액터와 변압기 등의 선정 및 설계시 최적화에 문제가 있어 실증시험에서 측정된 변환효율이 표 1에서 제시한 규격과 비교해서 전범위 동작영역에 3%~9%정도 저하되어 PCS 손실이 5%정도 증가되면서 PV시스템의 발전성능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. PCS(system3)의 실측성능이 규격에서 제시한 성능과 같을 경우, PR이 0.71 정도로 PV시스템이 비교적 양호한 성능을 가진다는 것을 예측할 수 있다.
- (3) PV시스템(system2, system3)의 구성요소기기인 PCS와 PV모듈의 실측성능이 표 1에서 제시된 규격의 성능과 같다면 PV시스템의

발전성능이 15%이상 개선될 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다.

향후에는 실증시험에서 수집된 장기간의 실측결과들을 데이터베이스화하여 PV시스템 및 구성요소 기기의 성능개선, 신뢰성 및 안정성 기술 등의 실용화 기술들을 확립할 수 있는 최적설계기술 개발, 계통연계시의 문제점과 대책기술에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2002년도 광운대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. 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.
2. Didier Thevenard, Performance monitoring of a northern 3.2kWp grid-connected photovoltaic system, IEEE, 2000, pp. 1711-1715.
3. T. Ergc, V. U. Hoffmann, and K. Kiefer, "The German experience with grid-connected PV systems" Solar Energy, Vol. 70, No. 6, 2001, pp. 479-487.
4. E. E. Van Dyk, E. L. Meyer, F. J. Vorster, and A. W. R. Leitch, Long-term monitoring of photovoltaic devices, Renewable Energy, Vol. 25, Issue 2, 2003, pp. 183-197.
5. M. Sidrach-de-Cardona, and LI. Mora Lopez, Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system, Energy, Vol. 24, Issue 2, 2003, pp. 93-102.
6. T. Sugiura, T. Yamada, H. Nakamura, M. Umeya, K. Sakura, and K. Kurokawa, Measurements, analyses and evaluation of residential PV systems by Japanese monitoring program, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 75, Issues3-4, 2003, pp. 767-779.
7. 소정훈, 유권종, 최주엽, 시뮬레이션에 의한 PV시스템 설치방식의 최적설계에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 3, 2003, pp. 1- 6.