

# 계통연계형 태양광발전시스템의 실증운전 평가

김의환\*, 안교상\*, 임희천\*

\*한전 전력연구원 (kimehwa@kepcoco.kr/ ksahn@kepcoco.kr/ imhchn@kepcoco.kr)

## The practical operating evaluation of the grid connected PV power system

Kim, Eui-Hwan\*, Ahn, Kyo-Sang\*, Lim, Hee-Chun\*

\*KEPRI / KEPCO (kimehwa@kepcoco.kr/ ksahn@kepcoco.kr/ imhchn@kepcoco.kr)

### Abstract

The purpose of this paper is to explain the real characteristics of generation system of large scale power system of high voltage the grid connected PV power system for electricity industry. Main system is made up PCS in the class 150kVA. and we studied commercial operation in Korea-Western Power Company,(Tae-An headquarter) with the capacity of module is 122.5 kW<sub>p</sub>. On the average, power plant utilities' utilization is 12.71 percent and consumption rate is 6.66 percent. We operated normally since 25th, August 2005 without any other problems.

Keywords : 태양광발전시스템(PV System), 전력변환장치(Power Conditioning System; PCS), 소내 소비율(Auxiliary Power Ratio), 출력주파수(Output-Frequency)

### 기 호 설 명

$V_{oc}$  : 개방전압 (V)  
 $V_{dc}$  : 동작전압 (V)  
 $W_p$  : 전력량 (W)

### 1. 서 론

국내의 태양광 산업은 정부의 보급정책에

힘입어 연간 40%이상 급신장을 하고 있다. 태양광발전은 국가 에너지의 97% 이상을 국외에서 수입하고 있는 우리나라 현실에 알맞을 뿐 아니라 정부가 발표한 국가에너지기본계획에 부응하는 청정 자연에너지원으로서 첨두부하 Peak-cut 역할을 담당할 수 있는 분산전원으로서 성장잠재력이 높은 것으로 알려져 있다.

국내의 태양광발전은 현재 약 143 MW<sub>p</sub>가 도입되어 상업 운전중에 있다. 특히 태양광발

투고일자 : 2008년 9월 11일, 심사일자 : 2008년 9월 17일, 게재확정일자 : 2008년 10월 16일  
교신저자 : 김의환(kimehwa@kepcoco.kr)

전의 확대 보급은 설비의 안전성 확보와 전력 계통과의 보호협조 측면에서 지속적인 신뢰성 향상을 위한 분석평가를 필요로 하고 있다.

본 논문에서는 태안발전본부에서 상업운전하고 있는 120 kW급 특고압 계통연계형 태양광발전시스템의 운전특성에 대하여 분석평가 함으로써 태양광발전시스템의 안정운전에 기초자료를 제시하고자 한다. 운전 평가기간은 2006년부터 2008년도까지이며, 약 3년 동안의 지속적으로 취득한 데이터를 기반으로 분석 평가하였다.

## 2. 시스템 개요

### 2.1 발전시스템 구성 및 규격

120 kW급 태양광 발전시스템의 구성은 태양전지 모듈, 120 kVA 전력변환장치(Power Conditioning System; 이하 “PCS”), 특고압 연계를 위한 송수전 변전설비 및 데이터 감시 및 취득을 위한 모니터링 시스템, 원격제어 시스템으로 각각 구성되어 있으며, 이 시스템의 규격과 구성도는 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. System 규격

구분	항 목	내 용	비 고
구성	출력 상수	삼상 4선식	
	인버터 제어방식	전압형 전류제어 PWM	
	스위칭 소자	IGBT	300 A 1,200V 2직렬
입력	정격전압	595 Vdc	
	전압변동범위	476~741 Vdc	
출력	정격 출력용량	120 kVA	
	정격 출력전압	계통선 전압 (380 Vac)	
	계통 전압변동율	±10 % 이내	
	정격출력 주파수	계통선 주파수(60 Hz)	±2 Hz
	정격출력 주파수 변동	계통선 주파수와 동기	
	출력전류 총왜율 (THD)	총합 왜율 5 % 이하 각차 왜율 3 % 이하	정격부하시
시스템	효 율	90 % 이상	정격부하시
	역 률	98.8 % 이상	
	과부하량	110 % / 10분	
	냉각방식	강제 공냉식	
	소 음	60 dB 이하	전방 1 m

보호기능	입력 저전압	460 V	
	입력 과전압	765 V	
	계통전압 저전압	342 V	정격 10 % 이하
	계통전압 과전압	418 V	정격 10 % 이상
	계통주파수 이상	동작 정지	3Hz 이상/이하
	주파수 동기 이상	동작 정지	2.86도 이하
Islanding현상 보호	380 ms	500 ms 이내	

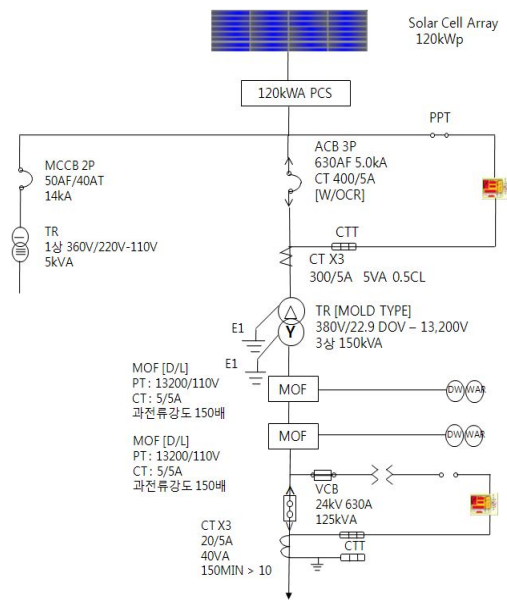


그림 1. 태양광발전 시스템 계통도

### 2.2 태양전지 어레이 구성

태양전지 어레이(Array) 구성은 80 W<sub>p</sub> 단 결정 실리콘 태양전지 모듈 1,530매, 태양전지 모듈 34매를 직렬로 연결하여 45 병렬 시스템으로 구성하여 설계 구축하였다. 이 때의 태양광발전의 개방전압 731 V<sub>oc</sub> 이고, 동작전압 578 V<sub>ac</sub> 이다. 총 설비 용량은 122.4 kVA급이 된다.

### 2.3 전력 변환장치

120 kW 태양광 발전설비를 구성하고 있는 계통연계형 PCS는 자력식 전류제어방식으로 기동시에 돌입전류를 억제하기 위해 Soft start 기능을 갖추고 있다. 전력사업용 태양광

발전을 위하여 순수한 국내기술에 의하여 설계/제작된 120 kVA급 PCS로, 운전개시 3년이 경과한 현재까지 특별한 문제점 없이 정상적으로 운전되고 있다. 표 2는 PCS 정출력 특성시험 결과를 나타내었다. 50%출력에서도 효율은 93%이상, THD는 2%이하로 우수한 성능을 나타내었으며, 표 3에서 단독운전 검출 시험에서 계통전원이 정전이 발생한 경우 이를 검출하고 대기상태까지 걸리는 시간은 약 380msec 정도로 나타났다. 단독운전 검출에 사용된 알고리즘은 수동적인 방법으로 전압·주파수검출법(Voltage and Frequency Detection Method)과 능동적인 방법으로 개선된 샌디아 주파수 변동(Sandia Frequency Shift) 기법을 적용하였다.

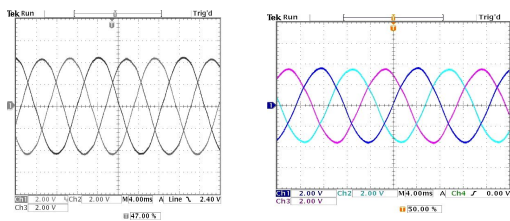
표 2. 최대전력 점특성

출력 (%)	입력		출력		효율 (%)	역률	THD (%)
	전력 (kW)	전압 (V)	전력 (kW)	전압 (V)			
50	64.1	380	59.7	93.1	0.99	1.97	
100	126.5	380	119.2	94.2	0.99	0.87	

표 3. 단독운전 검출시간

동작 모드	출력조건	동작시간	기준
연계→대기	100%	380ms	500ms이내

그림 2는 120 kW급 계통연계형 PCS의 출력 전압 전류를 나타내었다. 표 1에서 제시된 출력 규격에 부합하는 출력파형을 확인할 수 있었다.



(a) 전압(147V/Div) (b) 전류(160A/Div)  
그림 2. PCS 출력 (100% 출력시)

## 2.4 송수전 변전설비 규격

특 고압 연계를 위한 송수전 변전설비는 수

전설비에 송전개념을 도입하여 설계 하였다. 적용한 설비는 기존의 수전 설비에 IT 기술이 접목된 최신의 기술로서 이를 송전설비로 전환한 것이며 태양광 발전시스템의 도입 및 적용에 유용할 것으로 판단되고 있다. 태양광발전은 유지관리, 운전 및 운영의 편의성을 위하여 무인 원격제어운전이 가능하여야 하며, 이러한 조건으로 본 시스템의 송·수전 변전설비는 설계되었다. 본 변전설비는 120 kW급 태양광 발전시스템에 적용하는 것으로서 전력설비의 안전을 고려하여 150 kVA급을 선정하였다.

## 2.5 계통연계 운전특성

태안발전본부의 120 kW급 특고압 연계형 태양광발전은 전력산업기반기금과 한국서부발전(주)의 지원으로 수행한 연구개발사업의 성과물로서 전력시장에 진입한 발전설비이며, 계통한계 가격을 적용받고 있다. 2005년 8월 25일 준공하여 현재까지 문제점 없이 안정적으로 운영되고 있으며, 본 논문에서는 2006년 3월부터 2008년 4월까지 취득된 운전 자료를 분석 하였다. 그림 3은 태양광발전의 운전시와 정지시의 모듈 온도변화를 나타내고있다. 표 4는 공칭태양전지 동작온도 측정시험(NOCT)기준으로 태안 80W(5 inch cell 사용)모듈 온도 특성을 보여주고 있다.

표 4. 모듈 온도특성

항 목	온도특성
Air 20 °C sun 08kW/m <sup>2</sup> wind 1m/s	47 °C±2°C
Temp. coefficient of Isc	440mA/°C
Temp. coefficient of Voc	-116.1mV/°C
Temp. coefficient of power	-0.46%/°C

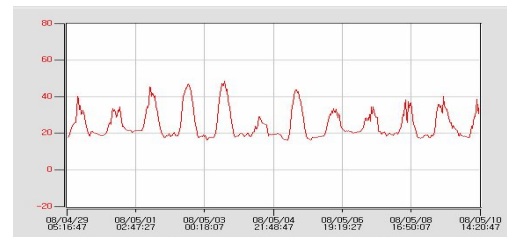


그림 3. 태양광발전시스템 모듈 온도변화

### 3. 분석결과 및 고찰

#### 3.1 전력품질 분석

태양광발전 출력 변화에 따른 실 계통 연계 운전시의 고조파 발생량 측정은 PZ 4000 Power Analyzer를 이용하여 측정하였다. 아래 표 5는 태양광발전 출력별 측정 결과를 요약 정리한 것이다. 기준에 제시되는 THD 5%는 발전 설비를 제외한 국부 연계계통의 1년 중 15분 최대 부하전류, 또는 (발전설비와 계통연계점 사이에 변압기가 있을 경우 이 변압기를 통과하는)발전설비 정격 전류용량 중 큰 값에 대한 고조파 전류의 비율을 의미하므로 측정결과가 기준을 만족함을 알 수 있다.

표 5. PCS THD 측정 결과

태양광출력(kWp)	17	42	75	92
전류 THD(%)	5.42	2.67	1.48	1.3

그림 4와 5는 각각 출력 주파수 특성과 출력 전압특성을 설명하고 있다. 이는 발전출력의 주파수와 전압을 측정 분석한 것으로 태양광발전이 계통과 연계하여 안정적으로 운전되고 있으며, 전압 및 주파수의 변동 또한 전력품질 유지를 위한 규정 범위 내에서 연속적으로 운전 한다는 걸 알 수 있다.

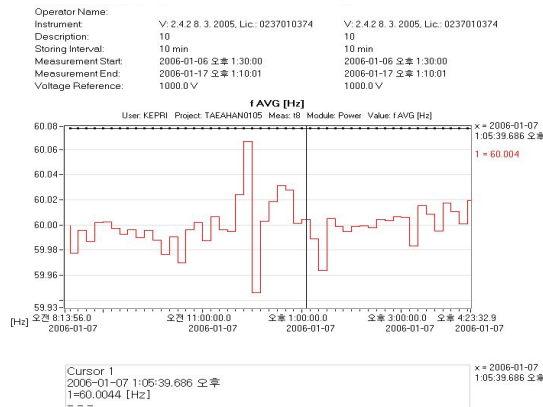


그림 4. 출력 주파수 특성

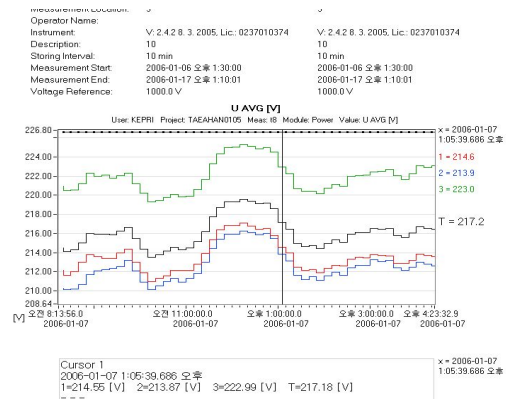


그림 5. 출력 전압 특성

#### 3.2 발전특성 분석

120 kW급 계통연계형 태양광 발전시스템을 시스템 운전에 따른 운전특성의 데이터를 수집하여 태양광발전의 수평면과 경사면 일사량, 그리고 모듈 표면온도 등이 함께 측정하여 태양광 발전특성을 분석하였다. 120 kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 특성을 파악하기 위하여 발전시스템의 이용율, 시스템 발전효율, Array 효율 및 송수전 변전설비 전력량을 분석하였으며, 발전하여 송전하는 동안의 소내 소비 전력량을 계측하였다. 분석에 사용된 식은 아래의 식(1)~식(3)과 같다.

$$\text{시스템이용율} = \frac{\text{시스템발전 전력량(kWh)}}{\text{시스템정격출력} \times 24 \times \text{일간}} \times 100(\%) \quad (\text{식 } 1)$$

$$\text{시스템발전효율} = \frac{\text{시스템 총 발전전력량}}{\text{경사면일사량} \times \text{PV어레이면적}(\text{m}^2)} \times 100(\%) \quad (\text{식 } 2)$$

$$\text{어레이효율} = \frac{\text{태양전지어레이 발전전력량(kWh)}}{\text{경사면일사량}(\text{kWh}/\text{m}^2) \times \text{어레이면적}(\text{m}^2)} \times 100(\%) \quad (\text{식 } 3)$$

#### 3.3 시스템 성능분석

그림 6은 시스템의 이용율을 분석한것으로서 연중 4, 5월이 가장높은 것으로 분석되었으며, 최대 16.5%로 나타났다. 반면에 12, 1월은 연중 이용율이 가장 낮은 시기로서 7.2%까지 떨어졌다.

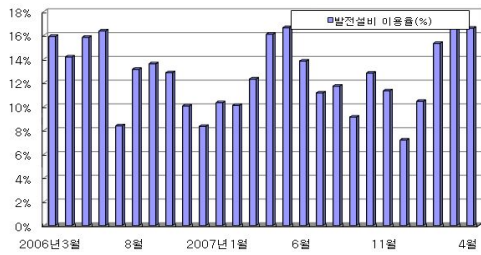


그림 6. 시스템 이용율

그림 7은 PV 어레이 및 발전효율을 보여주고 있다. 대체적으로 발전량은 봄, 가을에 더 많은 것을 알 수 있다. 분석기간 동안 하절기에 해당되는 7월과 8월에는 바깥온도 상승에 따른 태양전지 셀의 온도상승으로 인한 출력손실이 발생되었다. 그러므로 외부온도 상승이 우려되는 여름철에는 적절한 손실방지 대책이 필요하다. 또한 하절기의 잦은 우천과 같은 기상 변화에 의한 출력변동으로 인해 어레이 효율이 현저히 떨어짐을 분석자료를 통하여 확인할 수가 있다. 동절기에 해당되는 12월과 1월에는 온도가 낮은 저 일사강도에서 변환효율 특성에 변화를 일으킨다. 어레이 직·병렬 균형에 따른 출력손실이 발생하며 겨울철 날씨 특성상 결빙과 적설의 원인으로 현저히 어레이 효율이 떨어진것으로 분석된다. 이와 같이 기상조건의 영향에 따라서 변화하는 손실을 최소화할 수 있는 방지대책이 필요하며, 분석결과 본 시스템의 연 평균 이용율은 12.71%, 어레이 효율 9.88%, 발전효율은 9.22%로 평가 되었다.

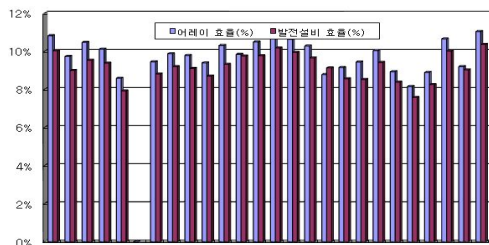


그림 7. Array 및 발전 효율

### 3.4 송수전 변전설비 전력량 분석

그림 8은 전류 불평형율을 나타내고 있다. 운

전시에는 불평형값이 검출 되지는 않지만, 정지 시에는 불평형값이 200% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 소내소비의 전원으로 단상 변압기를 사용하여 전원을 취한 결과로 판단되며 3상 누설전류의 점검이 필요한것으로 사료된다.

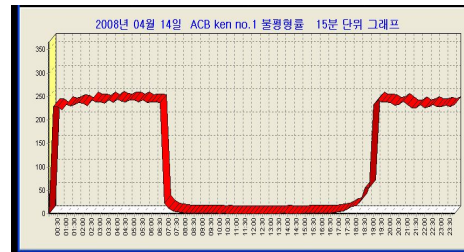


그림 8. 전류 불평형율 측정

그림 9는 송수전 발전설비 전력량을 보여주고 있다. 발전량은 일사량 분포에 비례하며 4월에 발전량이 제일 많음을 알 수 있고, 전력량도 16 MW를 초과됨을 알 수 있다. 한편 하절기인 8월에는 주변온도의 상승과 우천으로 인해 발전량이 감소되었으며, 12월에도 폭설 및 모듈표면의 결빙 등 외부 환경요인 의하여 발전량이 감소하였다.

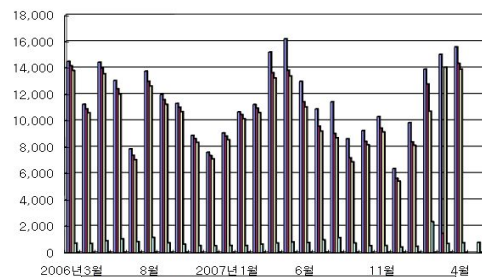


그림 9. 송수전 변전설비 전력량

소내소비 전력은 평균 765.2 kWh로 측정되었으며, 소내소비율은 6.66%이다. 하절기의 소내 소비전력이 높게 나타난 것은 냉방부하에 의한 것으로, 특히 8월은 발전량이 적은 상태에서 소내 소비전력량이 높아 소내 소비율은 9.79%로 증가되었다. 한편 1월의 높은 소비전력은 장시간 난방기기의 사용에 의한 것으로 분석되었다.

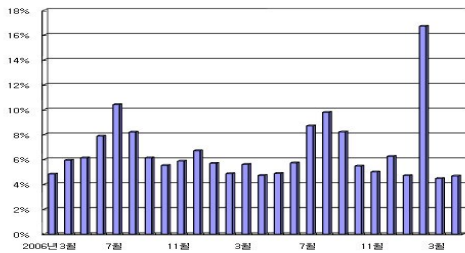


그림 10. 태양광발전설비 소내소비율

#### 4. 결 론

120 kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 운전특성 등을 비교 분석하였다. 그 결과 비교적 안정된 전압 및 주파수 특성에 의한 연속운전으로 신뢰성을 확인 할 수 있었다. 실계통 연계 운전시의 고조파 발생량을 분석하였으며 어레이 통합시스템의 운전특성(발전설비 이용율, 손실요인, 발전량, 소내소비율 등)을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- (1) 태양광발전 출력 변화에 따른 실 계통 연계 운전시의 고조파 발생량 분석결과 5% 이내의 기준을 만족함을 알 수 있다.
- (2) 시스템의 연평균 이용율은 12.71 %이며, 월별로는 연중 4월달에 가장높은 16.6%로 분석되었고, 반면에 12월에는 7.8%로 가장 낮은 이용율을 보였다. 이는 낮의 길이변화에 의한 이용율의 상관관계를 알 수 있다.
- (3) PV Array 효율은 9.88%로 분석되었다. 연중 3~6월에는 10%대 이상 비교적 높은 효율을 나타냈으나, 7~9월에는 9%대를 11~1월에는 8%대의 낮은 효율로 운전됨으로서 겨울철의 모듈표면에 발생하는 결빙과 여름철에 고열에 의한 모듈온도의 영향으로 분석된다.
- (4) 시스템의 발전효율은 9.22%로 분석이 되었다. 이것은 시스템의 운전개선이나 손실요인을 제거함으로써 효율을 향상시킬 수 있는 여지를 보여주고 있다.
- (5) 전력거래를 위한 특고압 송전을 위하여

소비되는 소내 소비전력은 월 평균 765.2 kWh를 소비하였으며 평균 6.66%의 소내 소비율로 분석 되었다. 소내 소비율을 낮추기 위해서는 자연 통풍을 이용한 절감 방안 등이 필요하다.

- (6) 시스템 운전 중에는 상 불평형이 없었으나, 정지 중에는 소내소비 전력을 사용하면서 단상 변압기에서 전원을 취한 결과 상 불평형이 발생되므로 삼상변압기 채용과 소비전력의 분배를 적절히 해야 할 것으로 사료 된다.
- (7) 한전의 상황실에 감지되지 않는 저전압 계전기 동작에 의한 정지가 몇 차례 발생하였는데 이는 배전선로의 말단부에서 큰 동력부하의 기동과 정지로 인한 것으로 분석되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Electric Power Research Institute, AP-335 1 : Photovoltaic Power Systems Research Evaluation : A Report of the EPRI Ad Hoc Photovoltaic Advisory committee, Prepared by Strategies Unlimited, EPRI, Palo Alto, CA, 1983, p. C-5.
2. U.S. Department of Energy, National Photovoltaic Program : Five Year Research Plan, 1987-1991, U.S. DOE, Washington D C, 1987, p. 26.
3. 通商産業省 エネルギー一廳, “新資源エネルギー” 一 便覽“, 通算産業祖師會出版部, 1995.
4. 산업자원부, “120 kW급 태양광 발전시스템의 실 계통 연계운전 적용 및 평가” 최종보고서, 2006.
5. 안교상, 김수창, 김신섭, 황인호, 박성연, 김영섭, 임희천, 오제명, “ 120kW 태양광 발전시스템의 설계/제작”, 대한전기학회 하계학술대회 2005.7
6. 분산형 전원의 배전계통 연계기술 기준, 한국전력공사, 2005.