

중규모 태양광발전시스템 장기 실증운전 평가

김의환*, 안교상*, 임희천*

*한전 전력연구원(kimehwa@kepco.co.kr/ ksahn@kepco.co.kr/ imhchn@kepco.co.kr)

The long-term operating evaluation of the grid connected photovoltaic system

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

*KEPRI / KEPCO(kimehwa@kepco.co.kr/ ksahn@kepco.co.kr/ fclim@kepri.re.kr)

Abstract

The 50 kWp grid connected photovoltaic system which was installed at KEPRI site in 1999 has been operated more than 10 years. In order to acquire long term operation characteristics of medium size photovoltaic system, the operation test data related on power generation electricity and capacity factor of 50 kWp system, which have been collected since 1999, were analysed. From the analysing results, 57.7 MWh in annual power generation electricity of 50 kWp photovoltaic system in 1999 has been decreased 49.1 MWh in 2005 and reached 41.9 MWh in 2008. In addition to, the capacity factor of 50 kWp photovoltaic system also showed 13.2 % in 1999, 11.2% in 2005 and finally reached 9.6% in 2008. The operation test data showed a trend of decreasing of generation electricity and capacity factor during the 10 years operation time and we guessed that was caused by solar cell performance degradation and decreasing of PCS system efficiency.

Key Words : 태양광 발전시스템(Photovoltaic System), 전력 변환장치(Power Conditioning System; PCS), 시스템 이용률(Capacity factor), 발전 전력량(Generation electricity)

1. 서 론

국내 청정 에너지원으로 주목받고 있는 태양광 발전방식은 신 재생에너지원 중에서 가장 실용화된 발전방식으로 운전 및 유지보수가 용이하며, 태양전지 모듈화가 가능하여 용량의 신축성이 있고, 무한의 태양에너지를 이용할 수

있다는 장점이 있다. 반면에 일사량에 의한 출력 변동 등 기상조건의 영향을 받는 단점이 있다.

이러한 특성으로 인해 태양광 발전은 차세대 성장 에너지원으로 각광 받고 있으며, 최근 문제되고 있는 지구환경문제 해결에도 부합할 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 또한 계통 연계형 태양광 발전시스템의 확대 보급시 태양

투고일자 : 2009년 8월 12일, 심사일자 : 2009년 8월 18일, 게재확정일자 : 2009년 10월 15일
교신저자 : 김의환(kimehwa@kepco.co.kr)

광 발전시스템의 출력특성에 의한 기존 전력계통의 피크전력을 감소시키는 효과도 기대할 수 있다. 국내 태양광발전은 정부 지원정책에 힘입어 지속적으로 보급이 확대되고 있으며, 현재 약 308MWp 이상의 설비가 전력시장에 진입하여 상업 운전 중에 있다. 이러한 태양광발전의 확대 보급은 분산 전원설비로서 전력계통과의 안정성 및 신뢰성 확보가 아주 중요한 문제이다. 이러한 측면에서 태양광발전시스템의 장기 운전 분석평가는 설비의 안정성 및 지속적인 신뢰성 향상을 위한 아주 중요한 요소이다.

한전 전력연구원은 1999년부터 50kW급 중규모 계통연계형 태양광발전시스템 (대전시 유성구 문지동 소재)에 대한 실증시험을 계속 진행해 오고 있다. 본 논문에서는 한전 전력연구원 에서 지난 10년 동안 운전한 운전특성에 대하여 분석 평가하고 이를 통해 태양광 발전시스템의 장기운전에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다. 운전평가가 기간은 1999년부터 2008년도까지이며, 중간기간을 제외한 5년 동안 지속적으로 취득한 데이터를 기반으로 분석 평가하였다.

2. 시스템 개요

2.1 발전시스템 구성 및 규격

50kW급 태양광 발전 시스템은 크게 태양 전지 모듈로 구성된 태양전지 Array, 발생된 DC 전원을 AC 전원으로 변환시키는 50kVA 급 PCS, 그리고 보호설비가 있는 분전반과 계통연계 설비로 구성되어 있다.

2.1.1 태양전지 Array

태양광 발전시스템은 국내에서 제작된 53Wp 용량의 태양전지 모듈 총 960 매를 20 매씩 직렬로, 이를 3병렬 1군으로 하여 모두 16개 Array로 구성되어 있다. 이때 태양광발전 개방전압은 21.7V, 정격전압 17.4V이며, 설비용량은 50kVA, 별도 3kW급 단상 설비가 병렬로 구축되어 있다. 독립된 16개 Array 군

은 각각의 출력단에 Blocking diode, 차단 스위치, 전류 측정용 Shunt가 부착되어 있다.

2.2.2 전력 변환장치(PCS)

50kW급 태양광 발전설비에서 발생된 DC 전원을 AC 전원으로 변환 시키는 계통연계 PCS 시스템은 전압형 전류 제어 방식이다. 본 PCS 시스템은 태양전지 기동시 돌입전류를 억제하기 위해 Soft start 기능을 갖추고 있다. 전력사업용 태양광 발전을 목적으로 순수 국내기술로 설계 및 제작된 50kVA급 PCS시스템은 국내 최초 양방향 형태 PCS 시스템이다. PCS 시스템은 DC 입력전압 220~430V에서 AC 출력전압 3상, 220/380V로 변환시켜 연구원 내 저압 계통선과 연결된다. 태양광 발전시스템에서 생산된 전력은 PCS를 통해 교류로 변환된 후 연구원 내 수배전 설비 분전반과 연결되어 원내에서 필요로 하는 부하에 전원이 공급되도록 되어 있다. 이를 위해 각종 보호계전기 및 보호 장치가 장착되어 있다. 또한 발전시스템 운전현황 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템도 설치되어 있다.

표 1. System 규격

항 목	규 격	
태양 전지 모듈	종 류	단결정 실리콘 태양전지
	용 량	53 Wp
	효 율	14 %
태양 전지 Array	결선방법	20직렬×3병렬×16개 Array
	경 사 각	30°(정격전압 : 348 V)
PCS	용 량	약 50 kWp
	연계운전방식	전압형 전류제어방식
	정격출력	50 kVA
	직류입력전압	DC 220~430 V
	전력제어방식	MPPT 제어
	정격출력	AC 3상 220/380V, 60 Hz
	전력변환효율	94 % 이상(정격 출력시)
	보호기능	과전압, 단락, 정전, 결상, 주파수

표 1은 50kW급 태양광 발전시스템 기술 규격을 보여주고 있으며, 그림 1은 본 시스템의 구내 연결 계통도를 나타내고 있다.

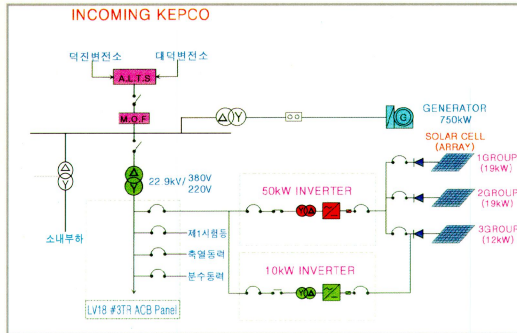


그림 1. 태양광발전 시스템 계통도

2.2 태양광 발전 운전 이력

50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템은 한전 전력연구원에서 실증시험용으로 1999년도에 연구원 구내에 설치하여 현재까지 운용하고 있다. 다만, 2001년도부터 2004년도 사이에 수행된 「주택용 태양광 발전시스템 개발(1~3kW 소규모 단상 PCS 국산화 개발)」 과제로 인한 PCS 국산화를 위하여 시스템이 분산되어 운전된 관계로 그 기간은 발전량을 환산하지 못해 제외하였다.

3. 분석결과 및 고찰

3.1 초기 태양광 발전시스템 운전특성

50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템의 초기 운전기간인 1999년 4월 8일부터 2000년 4월 30일까지 약 13개월 동안 총 63,389kWh의 전력을 생산하였다. 이때 월 평균 4,899kWh/monthly, 일 평균 164kWh/day의 발전 전력량을 기록하였다.

계통연계형 태양광 발전시스템에서 PCS는 태양광발전의 고 효율화, 발전전력의 고 품질화 및 배전계통과의 연계시 안정성 확보 등의 기능을 필요로 한다. PCS THD의 교류전류 파형 왜율은 Power Scope를 사용하여 출력별로 측정하였다.

초기 1년간 PCS 전류 파형 왜율은 50% 부하 이상에서 2.5% 이하로 대단히 양호한 상태를 보여 주고 있으며, PCS의 전력변환 효율도 1/2 부하 이상에서 92% 이상의 높은 변환 효율을 나타내고 있다. 측정결과에서 보듯이 분산형 전원으로서는 계통연계

형 태양광 발전시스템의 전류파형 왜율은 정상 출력에서 배전계통으로의 영향은 거의 없는 양질의 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 표 2 에서는 초기 PCS의 입출력 특성을 보여주고 있다.

표 2. 초기 PCS 입·출력 특성

출력 (%)	PCS입력 (kW)	PCS출력 (kW)	효율 (%)	역율	THD (%)
0	-	-	-	-	-
20	11	10	90.9	0.999	4.8
40	22	20	90.9	0.999	3.1
50	25	23	92.0	0.999	2.5
60	32	30	93.7	0.999	2.1
80	41	38	92.7	0.999	1.6
90	46	42.5	92.4	0.999	1.5

표 3. 초기 1년 태양광 발전시스템 이용율(1999-2000)

월별	발전전력량 (kWh)	이용율 (%)	측정일수
99-04	4,220	15.29	23
5	6,306	16.95	31
6	5,204	14.46	30
7	5,204	13.99	31
8	4,604	12.38	31
9	4,144	11.51	30
10	4,904	13.18	31
11	4,175	11.60	30
12	3,947	10.61	31
00-01	3,626	9.75	31
2	5,291	15.20	29
3	6,093	16.38	31
4	5,971	16.59	30
	63,389 (4,899)	13.68	389

초기 1년간 발전시스템 이용율은 표 3과 같이 봄철에 높은 경향을 보여 주었다. 이는 태양의 일사시간에 의한 영향으로 분석되며, 이 기간 중 평균 이용율은 13.7%로 본 시스템의 가장 높은 연간 이용율 실적이다. 발전설비 출력의 주파수와 전압을 측정 분석한 결과를 그림 2와 3에서 보여 주고 있다. 본 시스템이 계통과 연계하여 안정적으로 운전되고 있으며, 전압 및 주파수의 변동 또한 전력품질 유지를 위한 규정 범위 내에서 연속운전 결과를 볼 수 있다.

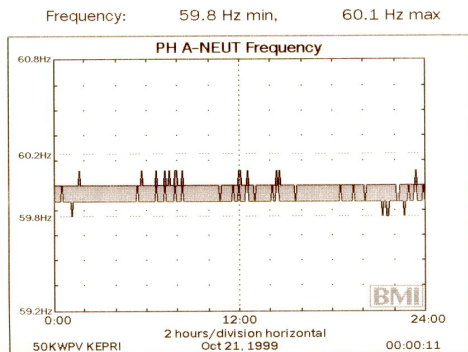


그림 2. 출력 주파수 특성

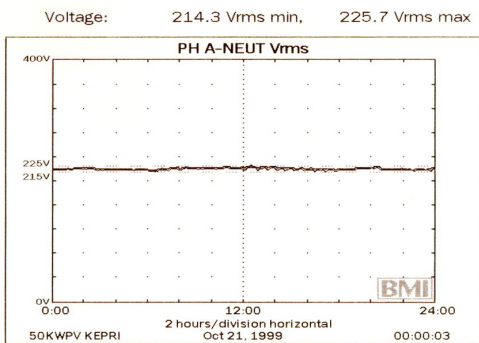


그림 3. 출력 전압 특성

3.2 장기간운전 후 시스템 운전특성

50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템의 장기 운전 성능을 파악하기 위하여 운전초기인 1999년도 부터 13개월간의 운전 자료와 장기간운전 후(96개월 : 8년)인 최근 1년간 운전 자료(2007.4.1-2008.4.30)를 비교하여 살펴보았다. 이때 발전시스템의 이용률 분석에 사용된 계산식은 식(1)과 같다.

$$\text{시스템이용률} = \frac{\text{시스템발전전력량(kWh)}}{\text{시스템정격출력} \times 24(h) \times \text{일주}} \times 100(\%) \quad (1)$$

50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템은 준공후 96개월(8년)이 경과된 최근(2007년 4월 1일부터 2008년 4월 30일까지) 13개월 동안, 총 49,349 kWh의 전력을 생산하였다.

이때, 월 평균 4,115 kWh/monthly, 일 평균 125 kWh/day의 발전전력량을 기록하였다.

표 4. 장기간운전 후 태양광 발전시스템 이용률(2007-2008)

월별	발전전력량 (kWh)	이용률 (%)	측정일수
07-04	4,197	11.65	30
5	4,898	13.16	31
6	4,682	13.00	30
7	2,875	7.72	31
8	3,555	9.55	31
9	3,190	8.86	30
10	4,448	11.95	31
11	3,698	10.27	30
12	1,798	4.83	31
08-01	2,308	9.75	31
2	4,170	12.41	28
3	4,461	11.99	31
4	5,069	14.08	30
계	49,349 (4,112)	10.41	395

표 5. 년도별 일사, 일조합(1999, 2005-2008)

년도별	일사합 (MJ/m ²)	일조합 (hr)
1999년	4727.8	2243.1
2005년	4819.9	2144.4
2006년	5072.5	1990.5
2007년	4945.3	1914.8
2008년	5317.1	2117.9

이는 운전초기 13개월간 운전되었던 총 발전 전력량 63,389kWh에 비하여 22.2% Point가 감소된 것이고, 이용률에서도 운전초기의 이용률 13.68%에서 3.21% Point 이상 저하된 것이다. 운전초기의 최대출력은 6,306kWh에서 5,069kWh로 최대 이용률은 16.95%에서 14.08%로 저하되었다.

표 5는 기상청에서 제공하는 대전지역 일사, 일조량을 분석한 데이터이다. 하루 동안에 태양에너지가 지상에 도달하는 에너지양의 합인 일사합은 2008년도에 5317.1MJ/m² 로 1999년도 대비 12.5%가 증가된 것으로 나타났다. 이처럼 일사량이 증가된 것에 반해 전체적인 시스템의 출력감소가 나타나는 것은 계절적 요인 보다 태양광 발전 시스템의 경년열화에 기인하는 것으로 여겨진다.

장기적인 운전관점에서 50kWp급 태양광 발전시스템의 발전출력을 분석한 결과 일사량의 차이는 있었지만 전체적으로 출력감소가 나타나고 있는 것으

로 분석된다. 그림 4는 1999년부터 2009년 초까지 월별 발전 전력량 변화량을 표시한 그래프이고, 그림 5는 연간 발전량의 변화를 보여주는 그래프이다.

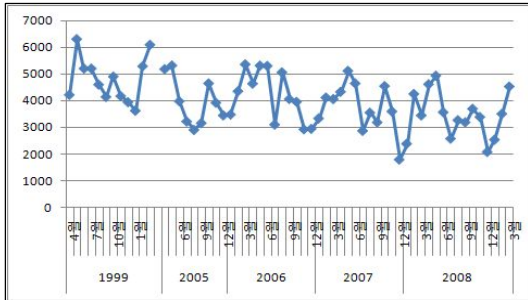


그림 4. 10년간 월별 발전량(kWh) 추이

그래프를 통하여 태양광 발전 시스템의 전체적인 출력곡선이 감소되는 경향이 나타나고 있음을 알 수 있다. 1999년도 월간 최대발전량이 5월에 6,306kWh 2008년도에는 월간 최대발전량이 5월의 4,939kWh로서 1999년도의 최대 발전량 대비 78% 수준으로 1,907kWh의 출력이 감소된 것으로 나타났다.

이와 같은 추세는 년도별 평균 발전량 분석에서도 알 수 있다. 그림 5에서 1999년도의 발전량은 57.7MWh로 나타났지만 6년 후인 2005년도에는 49.0MWh로 15.1% Point 감소되었으며 10년 후인 2008년도에는 41.9 MWh로 27.3% Point가 감소된 것으로 분석되었다. 운전초기부터 지난 10년 동안의 태양광 발전량 감소율을 단순 비교하는 경우 연간 약 2.73% Point의 발전량이 감소된 것으로 추정할 수 있다.

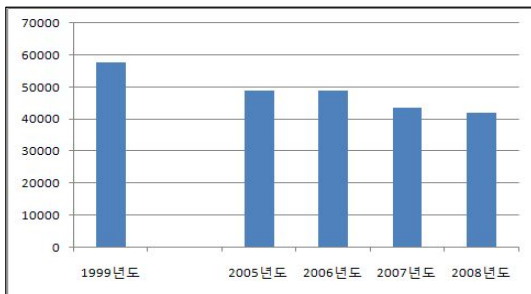


그림 5. 년도별 발전량(kWh)

이와 같은 경향은 계절별 혹은 기후변화에 따른 일사량의 변화에도 기인하고 있지만 전체적인 일사량 데이터와 발전량 경향을 살펴본 결과 시스템의 경년열화에 의한 결과로 추정된다. 장기운전에 따른 경년열화의 요인은 태양전지모듈의 열화와 더불어 PCS의 수명이 영향을 미치는 것으로 여겨진다. 시스템 이용율 변화는 계절적 요인이 많이 작용하는데, 년 중 4월에서 6월이 가장 높고 겨울인 12월과 1월이 가장 낮게 나타나고 있다.

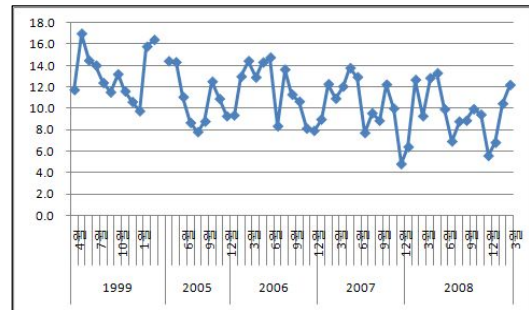


그림 6. 월별 시스템 이용율(%)

그림 6은 월별 시스템 이용율을 보여주고 있다. 이용율 분석결과 본 시스템의 지난 10년 동안의 연 평균 이용율은 11.04%로 나타나고 있다.

발전 시스템 운전 기간 중 시스템 이용율이 가장 높은 시기는 년 중 4, 5월이었으며, 전 운전 기간중에서는 1999년도 5월의 이용율이 16.95%로 가장 높은 반면, 2007년도 12월에는 4.8%까지 떨어지고 있다.

이는 겨울철 강설에 의한 영향으로 분석되며, 단기적인 측면에서 이용율은 시스템 경년열화에 의한 영향보다는 외부 환경에 직접적인 영향을 받는 것으로 분석된다. 그러나 동일 월의 이용율을 비교할 때 장기적인 이용율 변화추세는 지속적으로 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 7은 연간 이용율 변화를 나타내는 그래프이다. 운전초기 13% 수준에서 2008년도에는 10% 이하 까지 이용율이 저하된 것을 알 수 있고, 이는 경년열화에 의해 시스템 이용율 역시 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

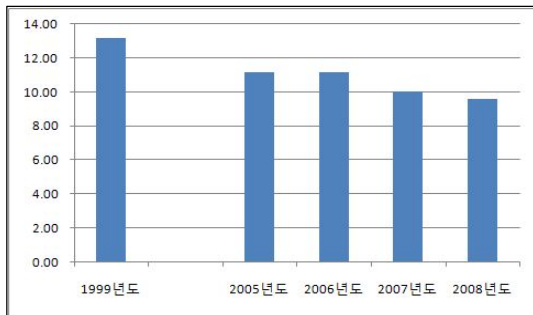


그림 7. 연도별 시스템 이용률 변화(%)

특히 동절기에 강설과 하절기의 잦은 우천과 같은 기상 변화에 의한 출력변동으로 인해 시스템 이용률이 현저히 떨어지는 것을 분석 자료를 통하여 확인할 수 있다. 따라서 출력이 급격히 떨어지는 동절기 및 하절기에는 적절한 손실방지 대책이 필요하다.

4. 결 론

1999년 한전 전력연구원 구내에 설치된 50kWp 급 태양광 발전 시스템을 대상으로 지난 10년간의 장기 운전 특성을 확인하기 위하여 발전 전력량 및 이용률 변화에 대한 분석을 실시하였다. 분석 결과 장기연속 운전에 따른 시스템의 운전특성의 변화를 확인 할 수 있었고, 위의 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 50kWp급 태양광 발전시스템의 장기 운전 후 성능을 파악하기 위하여 장기운전 후(96개월) 최근 1년간 운전 자료를 운전초기 13개월 동안의 운전 자료와 비교하여 살펴보았다. 장기운전 후 1년간 발전 전력량은 49.3MWh로 초기운전 동일기간의 총 발전 전력량 63.4MWh에 비하여 22.2% Point 정도 감소하였고, 이용률에서도 초기 13.68%에서 9.6% Point 이상 감소하였다. 이는 계절적 요인에 의해 나타난 결과이기도 하지만 전체적인 태양광 발전 시스템의 경년열화에 기인하는 것으로 여겨진다.
- (2) 본 태양광 발전시스템 이용률은 1999년도의 16.95%에서 2005년 11.2%, 2008년도

에는 9.6%로 저하되었으며, 10년간 평균 이용률은 11.04%로 나타났다. 발전시스템 운전기간 중 시스템 이용률이 가장 높은 시기가 년 중 4, 5월이었으며, 전 기간중에서는 1999년도 5월의 이용률이 16.95%로 가장 높았고, 반면, 가장 낮은 이용률은 2007년도 12월로 4.8%까지 저하되었다.

- (3) 연도별 발전량은 1999년도에 57.7MWh, 2005년도에는 49.0MWh로 1999년도 발전량 대비 15.1% Point 감소하였고, 2008년도에는 41.9MWh로 1999년도 발전량 대비 27.3% Point가 저하되었다. 지난 10년간 발전량을 연간 감소율로 단순 계산하면 연 2.73% Point의 발전량이 감소하였다.
- (4) 이와 같은 발전량 감소 및 이용률 저하는 우선은 계절적 요인에 의해 기인하지만 전체적으로 감소하는 경향을 살펴보면 태양 전지 열화 및 PCS 등 시스템 경년열화에 기인하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Electric Power Research Institute, AP-3351 : 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 DC, 1987, p. 26.
3. 한국 전력공사, “50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템 개발 최종보고서”, 1999.
4. 산업자원부, “주택용 태양광 발전시스템의 운전평가 및 실용보급방안 연구 최종보고서”, 2003.
5. 분산형 전원의 배전계통 연계기술 기준, 한국전력 공사, 2005.