

태양광발전시스템의 장기운전에 의한 성능특성 분석

김의환*, 강승원, 김재언**

The Long-term Operating Evaluation of the Grid Connected Photovoltaic System

Euihwan Kim*, sengwon Kang and Jaeon Kim**

Abstract

Recently, photovoltaic systems have been devolved into much larger systems up to MW-scale. Photovoltaic industry participants give their focus on power generation capability of photovoltaic modules because their benefits can be decided from the amount of generation. The information on long-term performance change of photovoltaic modules helps to estimate the amount of power generation and evaluate the economic cost-benefits. Long-term performance of a PV system has been analyzed with operation data for 12 years from 1999 to 2010. In the first year, the amount of yearly power generation was 57.7 MWh with 13.2% capacity factor. In 2007, the amount of yearly generation was 44.3 MWh with 10.14% capacity factor, and in 2010, the amount was decreased down to 38.1 MWh with 8.7% capacity factor. The result means that long-term capacity factor has been 4.5% decreased for 12 years and that the amount of generation has been decreased 34.0% for 12 years which is 2.8 % per year. The latter capacity factor has been decreased faster than 0.20%, the average rate for 10 years. The performance decrease of the PV system is meant to be accelerated. The decrease of performance and utilization is due to aged deterioration of photovoltaic modules and lowering conversion efficiency of PCS.

Key words

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

(접수일: 2011. 5. 2, 수정일: 2011. 6. 7, 게재확정일: 2011. 6. 9)

* 한전전력연구원

■ E-mail : Kimehwa@kepco.co.kr ■ Tel : (042)865-5321 ■ Fax : (042)865-7569

** 충북대학교

■ E-mail : jekim@cbnu.ac.kr ■ Tel : (043)261-2423 ■ Fax : (043)263-2419

Nomenclature

L_s, τ : Capacity factor (%)

E_{use}, τ : PV system output (kWh)

P_0 : Array output (kWh)

τ : Measuring time (h)

1. 서론

태양광발전은 태양의 복사에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 시스템으로 가동부분이나 열기관이 없어 수명이 길고 운전과 유지보수가 용이하며 모듈로 구성되기 때문에 수요나 지형에 맞게 설계할 수 있다^(1,2). 이러한 특성으로 인해 태양광 발전은 차세대 성장 에너지원으로 각광 받고 있으며, 최근 문제되고 있는 지구환경문제 해결에도 부합할 수 있는 잠재력을 갖고 있다⁽³⁾. 또한 계통 연계형 태양광 발전시스템의 확대 보급에 따라 태양광 발전시스템의 출력특성에 의한 기존 전력계통의 피크전력을 감소시키는 효과도 기대할 수 있다. 국내 태양광발전은 정부 지원정책에 힘입어 지속적으로 보급이 확대되고 있으며, 2009년도 기준으로 약 400MWp 이상의 설비가 전력시장에 진입하여 상업 운전 중에 있다. 최근의 태양광발전시스템은 초기의 중소규모 용량의 범위를 넘어서, 수 MW급 대규모 이상의 태양광발전소가 건설되면서 대용량화되고 있다. 이러한 추세는 발전사업자들에게 발전량에 의해서 수익구조가 결정되기 때문에 설치된 태양광모듈의 발전량에 매우 민감한 반응을 보이고 있다. 이에 따라서 태양광발전소가 장기적으로 운전될 때 태양광모듈의 성능변화를 알 수 있다면 연차적으로 예상 발전량을 산출할 수 있을 뿐만 아니라 경제성을 평가하는데 상당히 유용한 자료로 활용할 수 있다. 이러한 점에 착안하여 한전전력연구원 원내(대전시 유성구 문지동)에 설치된 50kW급 태양광발전소에서 1999년부터 2010년까지 중간기간을 제외한 약 6년간의 태양광발전소의 장기운전에 따른 성능변화 특성을 분석하였다. 태양광발전시스템의 장기운전 분석 평가는 설비의 안정성 및 지속적인 신뢰성 향상을 위하여 아주 중요한 요소이다. 태양광발전의 확대 보급은 분산 전원설비로서 전력계통과의 안정성 및 신뢰성 확보에 있어서 아주 중요한 요소이다⁽⁵⁾. 본 논문에서는 한전 전력연구원에서 지난 6년 동안 운전한 태양광발전시스템의 운전특성에 대하여 분석 평가하고 이를 통해 태양광 발전시스템의 장기운전에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다. 운전평가 기간은 1999년부터 2010년도 까지이며, 타 실험으로 인한 데이터 취득이 중단되었던 중간기간을 제외한 6년 동안 지속적으로 취득한 데이터를 기반으로 수행하였다.

2. 시스템 개요

2.1 발전시스템 구성 및 규격

50kW급 태양광 발전 시스템은 연구원내의 부지에 도로를 따라서 가장자리 경사면에 그림자영향을 받지 않도록 남향으로 설치되어 있다. 시스템의 주요 구성요소로는 태양광을 받아서 DC 전력으로 변환시키는 태양전지 어레이(Array), 발생된 DC 전력을 AC 전력으로 변환시키는 50kVA급 PCS(Power Conditioning System)가 설치되어 있다. 태양전지는 실리콘 결정질 모듈형식을 채용하였으며, 감시기능과 운전데이터를 취득할 수 있도록 모니터링설비 등으로 구성되어 있다. 그 밖에 시스템의 부속설비로 보호설비가 있는 분전반과 계통연계설비 등이 있다. 모니터링설비 및 제어설비 등은 별도의 제어실 안에 배치함으로써 설비의 안정성을 높일 수 있게 설계되어



Fig. 1 태양광발전 시스템

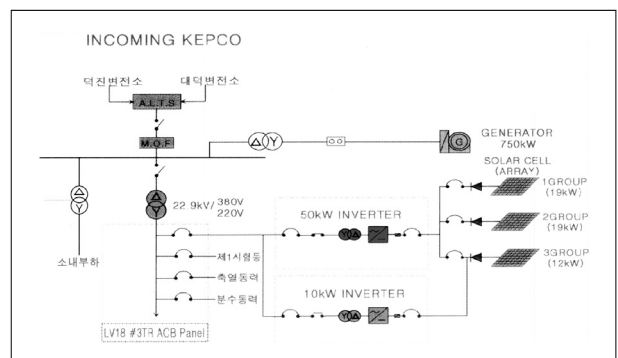


Fig. 2 태양광발전 시스템 계통도

Table 1. 태양광발전 시스템 규격

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

있다. 그림 1은 시스템 전경을 그림 2는 계통도를 보여주고 있다. 그리고 표 1은 시스템의 상세규격을 나타내고 있다.

2.1.1 태양전지 어레이

태양광 발전시스템은 국내에서 제작된 53Wp 용량의 태양 전지(Solar cell) 모듈이 총 960매를 20매씩 직렬로, 이를 3 병렬 1군으로 하여 모두 16개 어레이(Array)로 구성되어 있다. 이때 태양광발전 개방전압은 21.7V, 정격전압 17.4V이며, 시스템 설비용량은 50kVA이고, 별도로 3kW급 단상 설비가 병렬로 구축되어 있다.

독립된 16개 태양전지 어레이(Array) 군은 각각의 출력단에 역류방지다이오드(Blocking diode), 차단스위치, 전류측정용 분로기(Shunt)가 부착되어 있다.

2.1.2 전력 변환장치(PCS)

50kW급 태양광 발전설비에서 발생된 DC 전력을 AC 전력으로 변환 시키는 계통연계 형 PCS 는 전압형 전류 제어 방식이다. 본 PCS 시스템은 태양전지 기동시 돌입전류를 억제하기 위해 Soft start 기능을 갖추고 있다. 전력산업 태양광발전 실증을 목적으로 순수 국내기술로 설계 및 제작된 50 kVA급 PCS 시스템은 국내 최초 양방향 형태의 시스템이다. PCS 시스템은 DC 입력전압 220~430V에서 AC 출력전압 3상, 220/380V로 변환시켜 연구원 내의 저압 계통선과 연결된다. 본 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^(6,7).

2.2 태양광발전시스템 운전이력

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템은 한전전력연구원에서 실증시험용으로 1999년도에 연구원 구내에 설치하여 현재까지 운영하고 있다. 다만, 2001년도부터 2004년도 사이에 약 4년 동안에는 타 연구 목적으로 수행된 「주택용 태양광 발전시스템 개발(1~3kW 소규모 단상 PCS 국산화 개발)」과 제로 인하여 태양광발전시스템이 분산되어 타 용도로 운용된 관계로 그 기간은 발전량을 환산하지 못해 분석대상에서 제외하였다.

3. 분석결과 및 고찰

3.1 태양광발전시스템 운전초기 특성

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 준공 초기 운전기간인 1999년 4월부터 2000년 3월까지 12개월 동안 총 57,718kWh의 전력을 생산하였는데, 이것은 월평균으로는 4,810kWh/monthly를 일 평균으로는 158.3kWh/day의 발전 전력량에 해당하는 것이다.

계통연계형 태양광 발전시스템에서 PCS는 태양광발전의 고 효율화, 발전전력의 고 품질화 및 배전계통과의 연계시 안정성 확보 등의 기능을 필요로 한다. PCS에서 THD의 교류전류 파형 왜율은 Power Scope를 사용하여 출력별로 측정하였다. 운전초기 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 전원으로서 계통연계형 태양광 발전시스템의 전류파형 왜율은 정상 출력에서 배전계통으로의 영향은 거의 없는 양질의 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 표 2에서는 준공 초기

Table 2. PCS 입출력 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

Table 3. 태양광발전시스템 이용률(1999-2000)

월별	발전전력량(kWh)	이용률(%)	측정일수
'99-04	4,220	11.72	30
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	15.75	28
3	6,093	16.38	31
소계 (평균)	57,718 (4,810)	(13.2)	365

PCS의 입 출력 특성을 보여주고 있다.

본 태양광발전시스템의 운전초기 12개월간 발전시스템 이용률은 표 3과 같이 3월과 5월에 가장 높은 이용률을 보여주고 있다. 이는 태양의 일사시간에 의한 영향으로 분석되었으며, 운전초기의 1999년도의 연간 평균 이용률은 13.2%로 본 시스템을 구성하고 있는 모든 구성기기들의 상태가 운전초기 최상의 상태로서 최고의 성능이 발휘된 결과로 분석된다. 하지만 최근의 태양광발전소 평균이용률 15~16% 대비 2% Point 정도 낮은 수준인데 이것은 1999년도 준공당시 태양전지 제조 기술력의 낙후성 때문이다. 발전초기 발전설비 출력의 주파수와 전압을 측정 분석한 결과를 그림 3과 4에서 보여주고 있다. 본 시스템이 계통과 연계하여 안정적으로 운전되고 있으며, 전압 및 주파수의 변동 또한 전력품질 유지를 위한 규정 범위 내에서 연속운전 결과를 볼 수 있다.

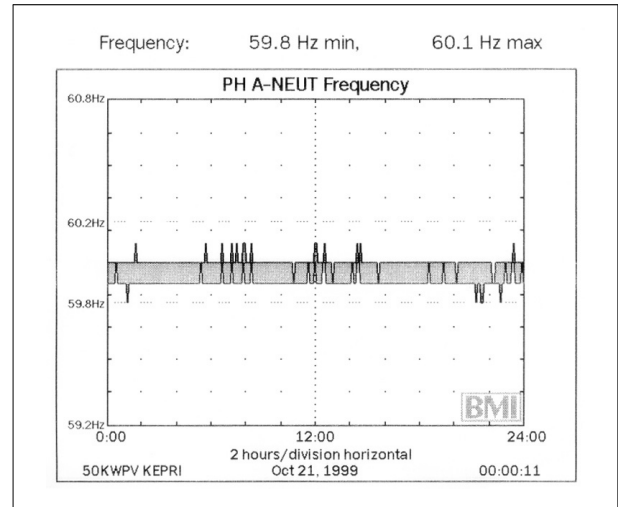


Fig. 3 출력 주파수 특성

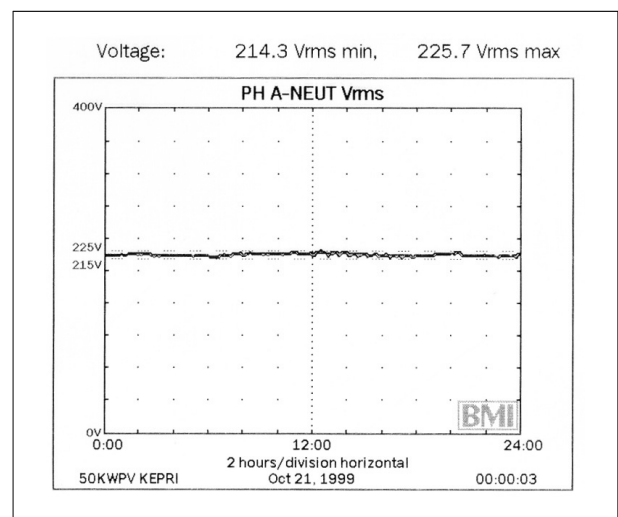


Fig. 4 출력 전압 특성

3.2 장기운전 성능특성 변화

50kWp급 계통연계형 태양광 발전시스템의 장기 운전 성능을 파악하기 위하여 운전초기인 1999년도 부터 12개월간의 운전 자료와 그로부터 장기운전 8년후(2007.4~2008.3)기간과 11년후(2010.4~2011.3) 기간 동안에 운전자료를 비교하여 분석하였다. 먼저 2007년도의 연간 발전량은 44,280kWh/year를 기록하였고, 2010년도에서는 38,083kWh/year 전력을 생산하였다. 이를 월 평균 전력량으로 환산하면 각각 3,690, 3,174kWh/monthly였다. 이는 운전초기 1999년도의 발전량

57,718kWh에 비하여 각각 23.1%, 34.0% Point가 감소된 것이고, 발전량의 연간 평균감소율로 환산할 때 2007년도에는 감소율이 2.9%에서 2010년도에는 3.1%로 점차 연간발전량의 감소폭이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 장기운전에 따른 설비의 노후화로 인한 경년열화에 기인하는 것으로 분석된다.

이용률에서도 운전초기의 이용률 13.2%에서 8년차에서 10.14%로 저하되었으며, 11년차에서는 8.7%로 저하되어 11년차에 이르러 10%대 이하로 감소되는 것을 알 수 있다. 표 4, 5는 장기운전후 이용률을 나타내고 있다.

여기서 이용률은 다음과 같은식으로 계산된다.

$$Ls, \tau = \frac{E_{use, \tau}}{P_0 \times \tau} (\%)$$

Table 4. 장기운전 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
소계 (평균)	44,280 (3,690)	(10.14)	365

Table 5. 장기운전 이용률(2010-2011)

월별	발전전력량(kWh)	이용률(%)	측정일수
'10-04	4,441	12.3	30
5	4,204	11.3	31
6	3,695	10.3	30
7	2,768	7.4	31
8	2,526	6.8	31
9	2,818	7.8	30
10	2,840	7.6	31
11	3,017	8.4	30
12	2,069	5.6	31
'11-01	2,919	7.8	31
2	2,638	7.9	28
3	4,148	11.2	31
소계 (평균)	38,083 (3,174)	(8.71)	365

표 6은 기상청에서 제공하는 대전지역 일사, 일조량을 분석한 데이터이다. 하루 동안에 태양에너지가 지상에 도달하는 에너지양의 합인 일사합은 2008년도에 5317.1MJ/m²로 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 있다. 그림 5는 1999년부터 2011년 초까지 월별 발전전력량을 표시한 그래프이고, 그림 6은 연간 발전량의 변화를 보여주는 그래프이다. 그래프를 통하여 태양광 발전 시스템의 전체적인 출력곡선이 뚜렷하게 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 1999년도 월간 최대발전량이 5월에 6,306kWh, 2007년도에는 5월의 4,898kWh로서 1999년도의 최대 발전량 대비 77.6% 수준으로 1,408kWh의 출력이 감소된 것을 알 수 있다.

이와 같은 추세는 년도별 평균 발전량 분석에서도 알 수 있

Table 6. 년도별 일사, 일조합

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
2009년	5,333.6	2,180.4

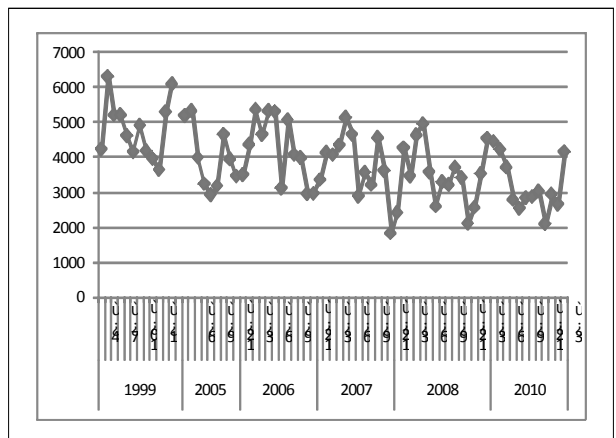


Fig. 5 월별 발전량(kWh)

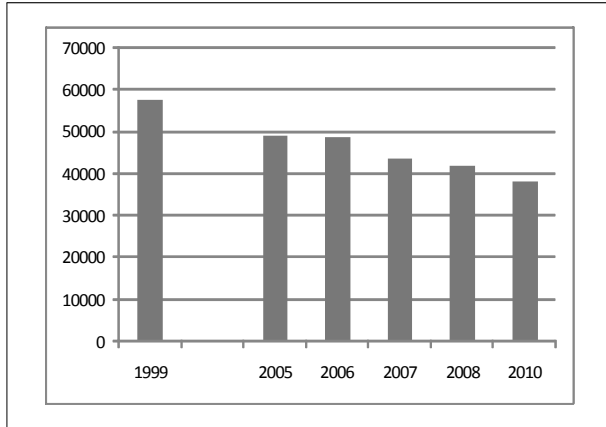


Fig. 6 년도별 발전량(kWh)

다. 그림 6에서 1999년도의 발전량은 57.7MWh로 나타났지만 8년 후인 2007년도에는 44.3MWh로 23.2% Point 감소되었으며 11년 후인 2010년도에는 38.1MWh로 34.0% Point가 감소된 것으로 분석되었다. 이것은 1999년도의 운전초기 발전량 대비 66% 수준으로 연간평균 단순 계산시 매년 약 2.8% Point씩 발전량이 저하되는 것으로 분석되었다. 이것은 운전초기 부터 지난 8년 동안의 태양광발전량이 매년 2.6% Point씩 발전량이 감소된 것과 비교할 때 감소폭이 0.2% Point 증가된 것으로서 장기운전 경과와 함께 발전량의 감소폭이 점점 증가되는 것을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 일시적인 계절별 혹은 기후변화에 따른 일사량의 변화에도 기인하고 있지만 전체적인 일사량 데이터와 발전량 경향을 살펴본 결과 시스템의 경년열화에 의한 결과로 추정된다. 태양전지 모듈의 손상요인으로는 전극의 손상, 강화유리의 크랙에 의한 습기유입, 오염물질에 의한 얼룩 등이 관찰되었다. 다음으로 인버터(Inverter)에서 손실요인을 찾을 수 있는데 회로소자의 열화로 인한 최적의 MPPT(최대출력추종제어) 제어에 영향을 미친 것으로 사료된다. 하지만 인버터 기능 특성상 그 크기는 제한적으로 판단된다. 시스템 이용률 변화는 계절적 요인이 많이 작용하는데, 년 중 4월에서 6월이 가장 높고 겨울인 12월과 1월이 가장 낮게 나타나고 있다. 그림 7은 월별 시스템 이용률을 보여주고 있다.

이용률 분석결과 본 시스템의 지난 운전초기의 13.2%에서 2010년의 8.7%까지 저하된 것으로 분석되었으며, 감소폭은 4.5% Point이고, 이를 연간으로 단순 계산시 매년 0.37% Point가 감소되는 것으로 추정할 수 있다. 발전 시스템 운전

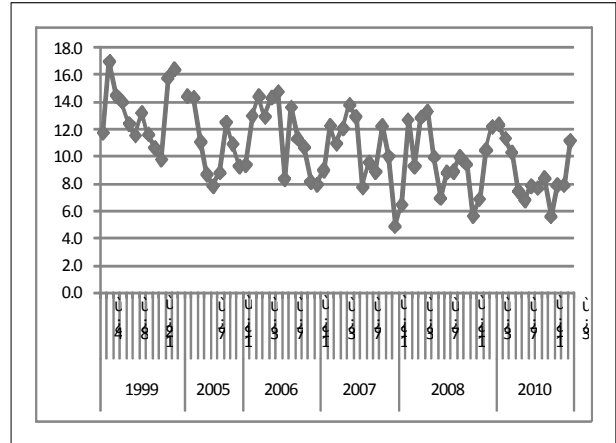


Fig. 7 월별 시스템 이용률(%)

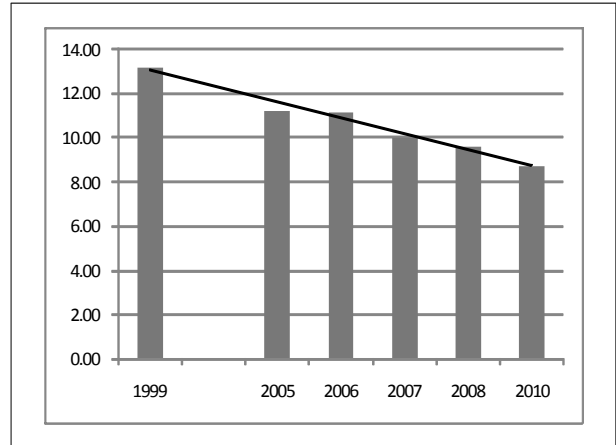


Fig. 8 년도별 시스템 이용률(%)

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

이는 겨울철 강설에 의한 영향으로 분석되며, 단기적인 측면에서 이용률은 시스템 경년열화에 의한 영향보다는 외부 환경에 직접적인 영향을 받는 것으로 분석된다. 그러나 동일월의 이용률을 비교할 때 장기적인 이용률 변화추세는 지속적으로 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 8은 연간 이용률 변화를 나타내는 그래프이다. 운전초기 13.2% 수준에서 2007년도에는 10.14%까지 이용률이 저하되었고, 2010년도에는 8.7%까지 저하된 것으로 분석되었다.

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. 결론

1999년도에 한전전력연구원 구내에 설치된 50kWp급 태양광 발전 시스템을 대상으로 지난 12 년간의 50kWp급 태양광 발전시스템의 장기 운전 후 성능을 파악하기 위하여 운전초기인 1999년도를 기준으로 장기운전 이후 2007년도 및 2010년도를 대상으로 운전 자료를 비교 분석하였다.

분석 결과 장기연속 운전에 따른 시스템의 운전특성의 변화를 확인 할 수 있었고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다

- (1) 장기운전 후 2007년도, 2010년도의 발전량은 44.3, 38.1 MWh로 운전초기 1999년도 동일기간의 총 발전량 57.7 MWh에 비하여 23.2%, 34.0% Point가 감소하였다. 이것은 연간 감소율로 환산하면 운전 초기대비 연 2.8% Point씩 감소된 것으로 분석된다. 특히 장기운전 11년이 지난 최근에 감소폭이 점점 증가되는 것을 알 수 있으며, 이는 태양광 발전시스템의 노후화로 인한 경년열화에 기인하는 것으로 여겨진다.
- (2) 본 태양광 발전시스템 이용률은 1999년도의 13.2%에서 2007년도에는 10.14%로 저하되었으며, 2010년도에는 8.7%까지 저하되었다. 이는 지난 12년간 단순계산시 매년 0.37% Point씩 이용률이 저하되는 것으로 추정할 수 있다. 발전시스템 운전기간 중 시스템 이용률이 가장 높은 시기는 년 중 4, 5월이었으며, 전 기간 중에서는 1999년도 5월의 이용률이 16.95%로 가장 높았고, 반면, 가장

- 낮은 이용률은 2007년도 12월로 4.8%까지 저하되었다.
- (3) 이와 같은 발전량 감소 및 이용률 저하는 일시적으로 계절적 요인에 의해서도 기인하지만 전체적으로 감소하는 경향을 살펴보면 태양전지 열화 및 PCS 등 시스템의 경년열화에 기인하는 것으로 판단된다.

References

- [1] Dr. F. Lasnier, 1998, Tony Gan Ang, "Solar Photovoltaic Handbook", Energy Technology Division Asian Institute of Technology, Vol. 1, pp. 10-50.
- [2] Electric Power Research Institute, AP-3351 1983, "Photovoltaic Power Systems Research Evaluation : A Report of the EPRI Ad Hoc Photovoltaic Advisory committee, Prepared by Strategies Unlimited", EPRI, Palo Alto, CA, pp. C-5.3.
- [3] Pitts A, C and Gyoh. L.E. 1997, "Optimisation of Photovoltaic Cladding Installation Photovoltaic", 14th. EC. Photovoltaics Solar Energy Conference, pp. 1835-1837.
- [4] U. S. "Department of Energy, National Photovoltaic Program", 1987' Five Year Research Plan, 1987-1991, U. S. DOE, Washington DC, pp. 26.
- [5] 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.
- [6] M Sidrach de Cardona, and LI Mora Lopez, Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system, Energy, Vol. 24, Issue 2, 3003, pp. 93-102.
- [7] 한국전력공사, "50kW급 계통연계형 태양광발전시스템 개발 최종보고서", 1999, pp. 103.
- [8] 한국전력공사, "분산전원 계통연계 실증시험 및 기술지침 수립연구", 2007, pp. 13.

김 의 환



1997년 충남대학교 기계공학과 공학석사
2001년 충남대학교 기계공학과 공학박사

현재 한전전력연구원 책임연구원
(E-mail : kimehwa@kepco.co.kr)

강 승 원



1989년 한국해양대학교 기관공학과 공학사
2005년 충남대학교 기계공학과 공학석사

현재 한전전력연구원 선임연구원
(E-mail : ksw4783@kepco.co.kr)

김 재 언



1982년 한양대학교 전기공학과 공학사
1984년 한양대학교 전기공학과 공학석사
1996년 교토대학교 전기공학과 공학박사

현재 충북대학교 전기전자정보대학 전기공학부 교수
(E-mail : jekim@cbnu.ac.kr)