

제주지역에 설치된 1MW 태양광발전소의 발전특성 분석

Analysis on the Generation Characteristics of the 1MW PV Plant in the Jeju Island

이 개 명* · 황 충 구*
(Gae-Myoung Lee · Choong-Gu Hwang)

Abstract - An 1 MW PV plant constructed at the Ara campus of Jeju National University in May 2012, which was the biggest roof-top PV plant in Korea and the biggest PV plant in Jeju Island at the time. In this paper the generation characteristics of the plant was analyzed on the basis of the data obtained during 2 years.

The amount of electrical energy generated by the plant in July was less than those by the PV plants of the other regions except Jeju Island in Korea, which might be due to the long rainy season started in June earlier than the other regions. But those generated by the plant during summer season was more than those during autumn, which was different trend from the other regions in Korea. And the yearly capacity factor of the plant was 12.7% which is low relatively in Korea.

The loss of the transformer in the plant, as expected, was shown to increase according to increasing the electrical energy generated by the plant. Summer's transformer loss was greater than spring's one in spite of summer's generated electrical energy less than spring's one, which tells that the transformer have the need to strengthen its cooling in summer.

Key Words : PV Plant, Generation Characteristics, Capacity Factor, Transformer Loss

1. 서 론

정부의 보조금에 힘입어 소형 태양광발전시스템이 활발히 보급되고 있으며, 발전사업자로 하여금 일정 비율 이상의 전기에너지를 의무적으로 신재생에너지원을 사용해 발전하게 하는 신재생에너지공급의무화(RPS: renewable portfolio standard) 제도에 힘입어 계통연계형 대형 태양광발전소가 꾸준히 건설되어 운영되고 있다[1]. 국외에서도 중국과 인도 및 선진공업국을 중심으로 태양광발전소의 건설이 확대되고 있으며, 인도와 인도네시아 등을 비롯한 개발도상국에서는 전기가 공급되지 않는 고립지역의 독립전원으로 태양광발전소의 보급이 활발히 진행되고 있다[2, 3].

중부발전(주)은 2012년 5월 한라산 해발 약 300[m] 지점에 위치해 있는 제주대학교 건물 옥상에 1MW급 태양광발전소를 완공하여 상업운전을 하고 있다. 건설 당시는 건물 옥상에 설치된 태양광발전소로 국내 최대 규모이었으며, 제주지역에 설치된 태양광발전소로도 최대 규모이었다. 태양광발전소를 건물 옥상에 설치하게 되면 건설비용이 많이 들지만 평지에 설치된 경우에 비해 발전한 전기에너지를 의무발전량으로 1.5배 인정받을 수 있는 장점이 있다[1].

대용량발전소의 설계, 계통연계, 인버터, 경제성에 관한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다[4-9]. 하지만 국내에서 RPS 제도 도입 후 MW급 태양광발전소 건설이 활발히 진행되고 있는 것에 비해 아직 그 운영 결과에 대한 연구보고는 많지 않다. 전국적으로 새롭게 건설되는 대용량 발전소의 설계와 운영에 대한 참고를 위해서도 앞서 건설된 대용량발전소에 대한 발전특성 분석에 대한 보고가 요망되고 있다.

제주대학교 태양광발전소는 우리나라 제일 남쪽에 위치한 제주지역에 세워진 최초의 대용량 Roof-top 방식의 태양광발전소로서 2년 이상 가동되었다. 본 연구에서는 제주대학교 태양광발전소의 구성에 대해 소개하고 2년간 발전한 결과에 대한 자료를 분석하여 태양광발전소의 발전특성을 조사하고자 한다. 이 결과를 바탕으로 앞서 보고된 타 지역 태양광발전소의 발전특성과 비교하고, 아울러 제주대학교 태양광발전소에 채택되어 설치되어 있는 변압기의 손실특성을 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 태양광발전소의 위치와 구성

제주대학교 태양광발전소는 제주도 한라산 북쪽 기슭, 위도 33.27°, 경도 126.33°, 고도 301[m] 제주대학교 아라캠퍼스에 자리하고 있다. 그림 1 구성도의 태양광발전시스템이 구축되었으며, 캠퍼스 내 14개 건물 옥상에 에레이가 설치되었고, 이들 에레이

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Korea.

E-mail: myounglk@jejunu.ac.kr

* Korea Midland Power Co.Ltd, Korea

Received : January 26, 2015; Accepted : April 23, 2015

출력단자는 독립된 변전소 내 인버터로 연결되며 변압기를 거쳐 한국전력(주) 아라동 D/L에 계통연결 되어 있다.

태양광발전시스템은 260[W] 실리콘결정질 모듈 4,180매로 구성되었고, 경사각 29.5°를 갖는 경사고정형으로 어레이가 설치되어 있다. 어레이 경사각은 태양광발전소 설계 시 10년간의 기후자료와 연중 경사일사량을 분석하여 29.5°로 결정되었다. 태양전지모듈은 20장씩 직렬로 연결되어 접속반으로 모아졌으며, 인버터는 250[kW] 4대, 100[kW] 1대로 구성되었으며 총 발전용량은 1.087[MW]이다. 태양전지 모듈, 인버터, 변압기의 사양을 표 1, 표 2, 표 3에 나타내었다. 제주대학교 태양광발전소의 일부 어레이의 배치 전경이 그림 2에 나타나 있다.

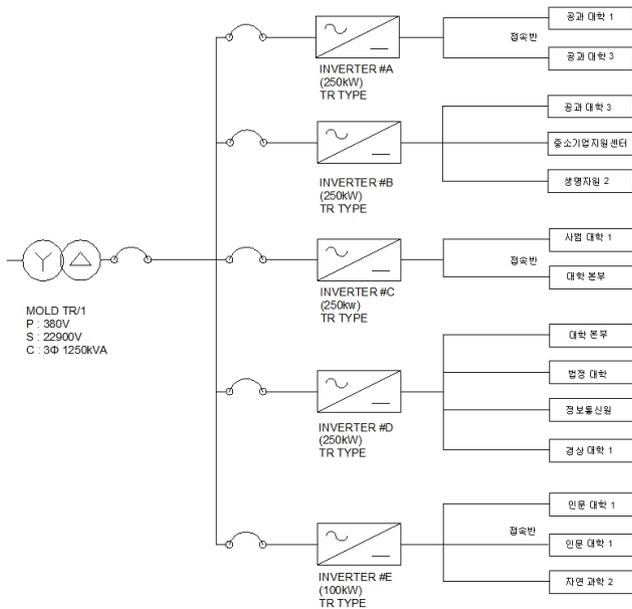


그림 1 제주대학교 태양광발전소의 구성
 Fig. 1 Configuration of the PV Generation System of Jeju National University

2.2 데이터분석 기간

2012년 9월 1일부터 2014년 8월 31일까지 2년간 태양광발전소가 발전한 데이터를 선택하여 분석에 사용하였다. 앞으로의 기술에 있어서 특별한 데이터 추출 기간에 대한 언급이 없는 경우 이 기간의 2년간 데이터를 사용한 것이다.

2.3 시간 평균 이용률

시간 평균 이용률의 2013년 9월부터 2014년 8월까지 1년간 평균을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 이용률은 설

비용량 1,087[kWh]를 기준으로 계산되었다. 그래프에서 이용률 값은 표기된 시간에서 1시간 동안 발전된 전력량에 대한 이용률의 평균이다. 예를 들어서 12시에서 이용률 값은 12시에서 13시까지의 발전량을 1시간 동안의 태양광발전소 정격 발전량 1,087[kWh]로 나눈 것이다.

표 1 태양전지모듈 사양

Table 1 Specifications of the solar cell module

| 항목 | 내역 |
|------------------|----------------|
| 수 량 [매] | 4,180 |
| 소재 종류 | 단결정실리콘 |
| 정격출력 [W] | 260 |
| 최대출력동작전압 [V] | 30.95 |
| 최대출력동작전류 [A] | 8.4 |
| 개방전압 [V] | 37.27 |
| 단락전류 [A] | 9.12 |
| 정격효율 [%] | 16.26 |
| 모듈크기(W×H×D) [mm] | 982×1,628×40 |
| 제조사 및 모델 | 신성솔라 SS-BM260C |

표 2 인버터 사양

Table 2 Specifications of the inverters

| 구 분 | 250kW 인버터 | 100kW 인버터 |
|---------------------------|---|-------------------|
| 항 목 | | |
| 수 량 [대] | 4 | 1 |
| 설계방식 | 저주파 절연변압기방식 (Y-Δ) | 저주파 절연변압기방식 (Δ-Y) |
| 정격입력전압 [V _{ac}] | 450 ~ 820 | 300 ~ 600 |
| European효율 [%] | 96.2 | 96.3 |
| 최대출력동작전류 [A] | 608 | 226 |
| 크기 (W×H×D) [mm] | 2,200×2,215×850 | 1,000×2,095×800 |
| 무 게 [kg] | 2,350 | 1,250 |
| 제조사 및 모델 | 현대중공업 HPC-250HT | 현대중공업 HPC-100HT |
| 보호기능 | 입력 과전압 및 저전압, 출력 (계통) 과전압 및 저전압, 계통주파수 이상, 입력 과전류, 출력 과전류, 단독운전방지, 인버터 과열 | |

표 3 변압기 사양

Table 3 Specifications of the transformer

| 항목 | 내역 |
|-----------------|-------------------|
| 형식 | 물드변압기 |
| 용량 [kVA] | 1,250 |
| % 임피이던스 [%] | 7.0 |
| 수량 [대] | 1 |
| 효율 [%] | 99.4 |
| 전압변동률 [%] | 1.3 |
| 무부하전류 [%] | 2.5 |
| 크기 (W×D×H) [mm] | 1,950×1,000×1,950 |
| 무게 [kg] | 4,300 |
| 제조사 | 산일전기 |



그림 2 태양광발전소 일부 에레이 배치 전경
Fig. 2 View of some arrays in the PV plant

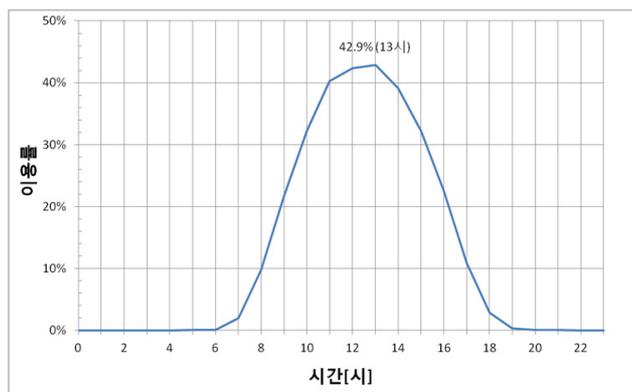


그림 3 시간대별 이용률 (2013.09.01 ~ 2014.08.31)
Fig. 3 Capacity factor by hour of the PV Generation System (2013.09.01 ~ 2014.08.31)

그림 3에서 11시부터 15시까지 이용률이 높으며, 이들 시간대에서 평균 이용률이 41.1%이다. 앞선 보고에 의하면 우리나라에 설치된 태양광발전소들의 2005년 1월부터 2008년 8월까지의 시간대별 이용률 분석결과에 의하며 13시 최대이용률을 보여주었으며 그 값이 51%에 이른다[10]. 이 값은 그림 3의 제주대학교 태양광발전소의 시간대별 최대이용률 42.9%(13시~14시)보다 약 20% 정도 큰 값이다.

2.4 월간 발전량

2012년 9월부터 2014년 8월까지의 월간 발전량과 이용률의 2년간 평균을 그림 4에 나타내었다. 5월 발전량을 이용률로 환산하면 18.9%이며 이는 다른 월에 비해 10%이상 큰 값이다. 참고 문헌 [11]의 대전지역 3년간의 사례에서도 5월 발전량이 가장 많다. 반면에 참고문헌 [12]의 목포지역 2년간 사례에서는 3월에 발전량이 가장 많다. 한편 제주지역 6월의 발전량은 상대적으로 타 지역에 비해 적다. 이는 제주지역의 장마가 6월에 시작하고 타 지역은 주로 이보다 늦게 장마가 시작되어 7월에 장마기간의 대부분이 걸쳐지기 때문으로 보인다.

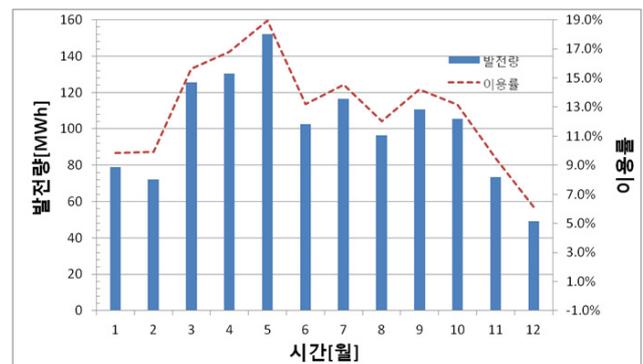


그림 4 월간 발전량과 월간 이용률의 2년간 평균
Fig. 4 Two-year averages of the amount monthly generated electrical energy and capacity factor

2.5 계절 별 발전량

2012년 9월부터 2014년 8월까지 계절 별 발전량과 이용률의 2년간 평균이 그림 5에 나타나 있다. 그림 5에서 3, 4, 5월이 봄으로, 6, 7, 8월이 여름으로, 9, 10, 11월이 가을로 그리고 12, 1, 2월이 겨울로 구분되어 있다. 특이한 점은 참고문헌 [10]의 우리나라 전체에 대한 태양광발전 통계에서는 가을철이 여름철보다 발전량이 많으나 제주지역 본 연구사례에서는 여름철 발전량이 가을철보다 많다는 것이다. 이는 연구가 진행된 시기에 제주지역 가을철에 흐린 날이 많았던 기후적인 요인이 큰 것으로 보인다.

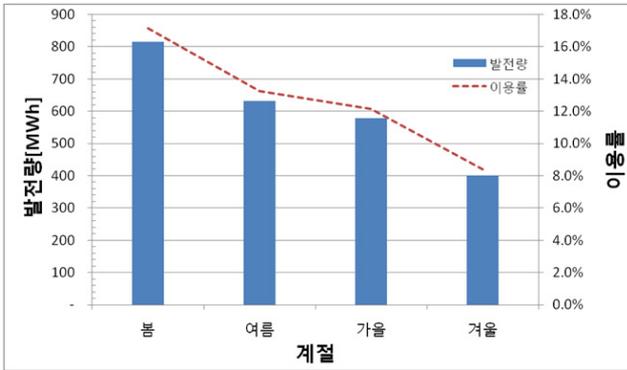


그림 5 계절 별 발전량과 이용률의 2년간 평균
 Fig. 5 Two-year averages of 4 seasonal generated electrical energy and capacity factor

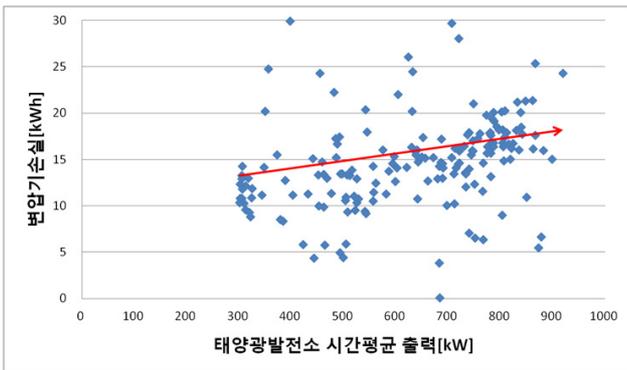


그림 6 태양광발전소의 시간평균 출력 변동에 따른 변압기 손실. 시간평균 출력이 300[kW] 이상인 2013년과 2014년 5월 데이터만을 사용
 Fig. 6 Loss of the transformer according to change of time average power. Only the data of May 2013 and 2014 whose time average power was greater than 300[kW] were used.

2.6 변압기 손실

제주대학교 태양광발전소는 변압기 1차측과 2차측의 출력을 측정하여 변압기 손실을 실시간 확인하고 있다. 변압기 출력 크기에 따른 변압기 손실에 변화가 있는지를 파악하기 위해 변압기 출력과 손실의 분포를 그림 6과 같이 나타내었다. 사용된 데이터는 1년 중 월간 발전량이 제일 많은 2013년과 2014년 5월의 것을 사용하였으며 시간당 발전량이 발전소 전체의 정격출력 발전량의 30% 정도인 300[kWh] 이상인 데이터만을 분석에 사용하였다.

그림 6에 엑셀프로그램을 이용해 구한 선형 추세선을 표시하였으며, 이 추세선을 통해 출력 300[kW]에서 출력 900[kW]로 변동함에 따라 출력 900[kW]에서 손실이 출력 300[kW]에서의 손실보다 약 30% 이상 증가함을 알 수 있다. 이는 출력 증가에

따라 동손이 증가하고, 또 하루 중 기온이 높을 때 태양광발전이 고출력에 도달함에 따라 솔라셀 기판 온도증가에 따른 솔라셀 손실이 증가한 것에 기인한 것으로 어느 정도 예상된 결과이다.



그림 7 월간 변압기 손실의 2년간 평균
 Fig. 7 Two-year averages of monthly transformer loss

월별 변압기 손실전력량을 월별 발전량과 함께 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 발전량과 손실전력량은 1달 동안 발전한 전력량과 변압기 손실전력량의 2년간 평균값이다. 그림 7의 그래프로 부터 7, 8, 9월의 발전량은 3, 4, 5월 발전량보다 적음에도 7, 8, 9월 변압기 손실전력량은 3, 4, 5월 변압기 손실전력량보다 많음을 알 수 있다. 앞선 그림 6의 결과로부터 발전량이 많을수록 변압기 손실이 증가하여야 하는데, 그림 7에서 7, 8, 9월의 변압기 손실전력량의 값은 3, 4, 5월 보다 30% 이상 크다. 이는 표 4에 나타나 있듯이 7, 8, 9월 외부기온이 3, 4, 5월보다 높기 때문에 상대적으로 변압기 냉각을 위한 방열기능의 효율성이 떨어져 변압기 온도가 상승하고 이에 따른 변압기 손실 증가로 인한 것으로 보인다.

2.7 발전량과 일조조건과의 관계

단기간 동안의 태양광발전소의 발전량은 일사량 또는 일조시간과 같은 일조조건에 비례할 것으로 예상할 수 있다. 한편 일조시간과 일사량은 지역의 기후적인 요소이므로 통계적인 관점에서 매년 일정기간에 반복적인 형태로 값을 가질 것으로 예상된다. 제주대학교 태양광발전소의 발전량이 일사량(이후 일사량은 경사일사량을 의미함) 또는 일조시간에 대응하여 어떻게 변동하

표 4 제주시의 월평균기온의 2년간 평균

Table 4 Two-year averages of monthly average air temperature in Jeju city

| | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1-6월 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 온도[℃] | 6.2 | 6.9 | 10.4 | 14.2 | 18.9 | 21.8 |
| 7-12월 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 온도[℃] | 26.9 | 27.1 | 23.0 | 18.8 | 12.5 | 7.4 |

는지를 조사하였다. 그림 7에 2년간 일조시간 및 일사량과 발전량의 관계를 월간 단위로 나타내었다. 일사량과 일조시간은 제주 기상청 기후자료 4곳의 자료 중 제주대학교 아라캠퍼스에 가까운 “제주” 기후자료의 데이터를 사용하였다. 그림 7에 나타난 것과 같이 일조시간, 일사량 및 발전량은 추이를 비교하기 위해 각각의 평균값으로 규준화시킨 값을 사용하여 그래프를 작성하였다.

예상한 바와 같이 그림 7의 결과에서 발전량, 일사량 및 일조시간이 거의 비슷하게 추이가 변화함을 알 수 있다. 즉 발전량이 일사량이나 일조시간에 비례함을 알 수 있다. 발전량이 일사량 또는 일조시간의 추이를 따르지 않고 편차가 생기는 기간은 2013년 7월과 8월, 2013년 12월과 2014년 1월, 2014년 7월과 8월이다. 해당 기간이 여름철과 겨울철이며, 발전량이 일사량보다는 일조시간 변수에 더 의존하여 비례적으로 연동됨을 보여 주고 있다. 13년 7월, 8월의 경우 고온의 날씨로 인해 솔라셀에서 손실과 2.6절에서 기술한 변압기손실의 증가로 인해 같은 일사량과 일조시간에서 발전량이 다른 월에 비해 적었던 것으로 보인다. 통계청 자료에 의하면 2013년 7월과 8월의 기온이 2014년 7월과 8월에 비해 월평균 기온이 3~4℃ 높았다. 또한 부분적으로는 봄, 가을철 최적각 29.5°로 선정된 어레이 경사각에도 그 원인이 있는 것으로 보인다.

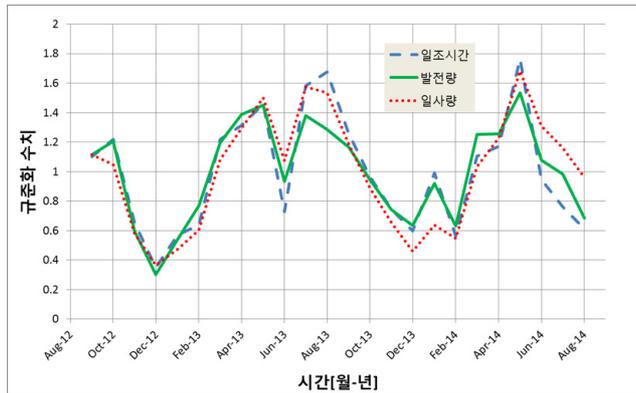


그림 8 발전량과 일조조건과의 관계
 Fig. 8 Relation between the amount of generated electrical energy and the conditions of sunshine

2.8 연간 발전량

제주대학교 태양광발전소 2년간 발전량은 약 2,426 [MWh]이었으며 태양광발전설비용량 1,087[MW]을 고려하면 연간 이용률은 약 12.7%이었다. 2008년도 보고된 참고문헌 [3], [12]의 연구결과에 의하면 태양광발전시설의 우리나라 평균이용률은 15% 이상이었다. 하지만 연구대상 제주대학교 태양광발전시설의 이용률은 언급한 2개의 참고문헌에서 보고한 전국평균 값에 미치지 못했으며, 소규모이지만 참고문헌 [13]에서 보고한 제주지역 다른 태양광발전소

의 이용률 16.69% 보다도 낮다[13]. 이렇게 제주대학교 태양광발전소의 발전설비 이용률이 낮은 것은 제주대학교가 해발 300[m] 보다 높은 곳에 위치하고 있어 이동 중인 구름이 한라산에 걸려 제주대학교 태양광발전소 상공에 구름이 깔 가능성이 더 높기 때문인 것으로 추정된다

3 결과고찰

제주대학교 태양광발전소의 발전특성이 타지역 태양광발전소의 것과 다른 점은 우리나라에서 제주지역이 제일 먼저 장마가 시작되기 때문에 제주대학교 태양광발전소의 6월달 발전량이 타 지역에 비해 상대적으로 적다는 점과 제주대학교 태양광발전소의 여름철 발전량이 타지역과는 다르게 가을철 발전량보다 많다는 것이다.

7, 8, 9월에 외부 기온의 상승에 따라 태양광발전소의 변압기손실이 발전량에 비해 증가하는 것으로 분석되었으며 여름철 변압기 냉각을 위해 추가적인 설비의 도입이 경제성을 갖는지 검토해 볼 필요가 있다.

일조시간 또는 일사량에 태양광발전소의 발전량이 비례하게 되는데 여름철과 겨울철 발전량이 일조시간 또는 일사량 변동 추이 따라가지 않고 다소 어긋나게 되는데 여기에 대해서는 원인을 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

2장의 분석 결과를 종합적으로 살펴보면 제주대학교 태양광발전소는 지형적, 기후적 영향으로 인해 다른 지역에 설치된 태양광발전소보다 상대적으로 발전효율이 떨어진다. 하지만 제주대학교 건물옥상에 설치된 제주대학교 태양광발전소는 건물옥상에 설치됨으로써 신재생에너지 공급인증서 가중치 1.5를 부여 받게 된다. 옥상에 설치됨에 따른 태양광발전소 건설비용의 증가를 신재생에너지 공급인증서 가중치 1.5로 보상하게 되는데, 제주대학교 태양광발전소와 같이 낮은 발전효율을 가질 경우 낮은 발전효율 부분도 함께 보상이 되는지 검토할 필요가 있다.

4. 결 론

구축 당시 건물 옥상에 설치된 태양광발전소로서 국내 최대 규모이었으며 또 제주지역에 설치된 태양광발전소로서 최대 규모이었던 제주대학교 태양광발전소를 2년간 가동하여 획득한 데이터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 주대학교 태양광발전소의 6월 발전량이 타 지역에 비해 상대적으로 낮았으며, 또 여름철 발전량이 타지역과는 다르게 가을철 발전량보다 많았다. 한라산 중턱에 설치된 제주대학교 태양광발전소의 연간 발전량은 이용률이 12.7% 로 타지역에 비해 적었다. 여름철 태양광발전소의 변압기손실이 증가하고 이에 따른 여름철 변압기 냉각 수단의 추가적인 도입에 대한 검토가 필요하다. 여름철과 겨울철 발전량이 일조시간 또는 일사량 변동 추이 따라가지 않고 다소 어긋나게 되는데 여기에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원 사업에 의해 연구되었음

References

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea, "Managing and Operating Guidelines on RPS(Renewable Portfolio Standard)", June 2012

[2] I.N.S. Kumara, W.G. Ariastina, I.W. Sukerayasa and I.A.D. Giriantari, "1 MWp grid connected PV systems in the village of Kayubihi Bali; Review on location's characteristics and its technical specifications," International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp306 - 311, Oct. 2013

[3] P. Loka, S. Moola, S. Reddy, A. Skumanich, S. Fulton, S.C. Siah and P. Mints, "A Case Study for Micro-grid PV: Rural Electrification in India," IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp3379-3382, 2013

[4] A. J. Stranix, A. H. Firester, "Conceptual Design Of A 50 MW Central Station Photovoltaic Power Plant", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Volume: PAS-102 , Issue: 9 , pp3218 - 3225 , 1983

[5] Sangkuk Kim, Sukkeun Lee, Gi-eok Moon, "Design of MW PV Plant", The Korean Society for New and Renewable Energy Autumn Conference, pp71-71, 2010

[6] E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski, Q. Zhong, "Grid-Connected Photovoltaic Plants: An Alternative Energy Source, Replacing Conventional Sources", Industrial Electronics Magazine, IEEE Volume: 9 , Issue: 1, pp18 - 32, 2014

[7] Liming Liu, Hui Li, Yaosuo Xue, Wenxin Liu, "Decoupled Active and Reactive Power Control for Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded Modular Multilevel Converters", Power Electronics, IEEE Transactions on Volume: 30 , Issue: 1, pp176 - 187, 2015

[8] Z. Moradi-Shahrbabak, A. Tabesh, G. R. Yousefi, "Economical Design of Utility-Scale Photovoltaic Power Plants With Optimum Availability", Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 61 , Issue: 7 , pp3399 - 3406, 2014

[9] A. F. Panchula, W. W. Hayes, A. A. Kimber, "First-Year Performance of a 20-MW ac PV Power Plant",

Photovoltaics, IEEE Journal of Volume: 2 , Issue: 3, pp359 - 363, 2012

[10] Yongson Shin, Raehyuck Jung, Jaewhan Ko and Jongtaek Jeon, "Present Situation and Utilization-rate of a Mass Solar-power Plant in Korea," KIEE Power Engineering Division Autumn Conference, pp469-471, Nov. 2008

[11] Euihwan Kim, Sengwon Kang and Jaeon Kim, "The Long-term Operating Evaluation of the Grid Connected Photovoltaic System," Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy, vol. 7 No. 2, pp28-35, 2011

[12] Chaejoo Moon, Joungmin Lim, Younghak Chang, Soonyoul So and Byungchun Chol, "Power Survey of 30kW Solar System without tracking Mechanism," KIEE Summer Conference, pp1126-1127, July 2008

[13] Byungcheon Choi, Wangshin Kwak, "A Study on Regional Capacity factor of Photovoltaic Power Plant", The Korean Society for New and Renewable Energy Autumn Conference, pp110-113, 2008

저 자 소 개



이 개 명(Gae-Myoung Lee)

1961년 8월 19일생
 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업
 1990년 동대학 전기공학과 박사
 현 재 제주대학교 전기공학과 교수



황 충 구(Choong-Gu Hwang)

1959년 12월 12일생
 2002년 제주대학교 산업대학원 전자전기공학과 석사
 현 재 중부발전(주) 인천화력본부 발전운영실장