태양광 발전 시스템별 직사광선에 의한 발전효율 분석

이재덕, 이상봉
성균관대학교

Analysis on the power generation efficiency by the direct sunlight

Jaydy Lee, Sang-Bong Rhee
Sungkyunkwan University

Abstract The photovoltaic industry is growing at a tremendous speed. And it can be one of the key factors for success in the photovoltaic business to choose a suitable system, and setting it up right so as to get a maximum efficiency of the site. Therefore, it is regarded to be necessary to research the efficiency of systems to catch maximum photovoltaic energy. In this research, the expected power generation efficiencies are analysed, and compared with each other. This research considered the direct sunlight only, and the angle between the direction of solar panel and sunlight as factors to affect the power generation. Therefore, only rough analyses and estimations are found on 3 systems of fixed system, double-axes tracking system, and horizontal tracking system.

1. 서 론

태양광 발전 사업은 최초에 발전소 건설을 하면 투자가 완료되고, 발전소의 수명이 다 할 때까지 변경할 수도, 사업 중단을 할 수도 없는 사업인 관계로 초기에 경제적이고 효율적인 시스템을 선정하는 것이 사업 성공의 관건이라고 할 수 있다. 그러나 발전 시스템 별 효율, 혹은 성과에 대하여 정확한 자료가 없는 관계로 태양광 발전 사업자들이 사업 시작 시 어려움을 겪고 있다.

태양광 발전소는 동일한 시스템이라도 그 발전소의 위치에 따라 달리 적용하여야 최대의 발전 효율을 가져올 수 있다. 따라서 부지의 여건에 맞는 태양광 발전 시스템의 발견과 이를 현장에 적용할 수 있는 tool을 개발하는 것이 시급한 문제인 것으로 인식되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 태양광 발전을 위한 효율을 계산하는 방법을 분석하였다.

태양광이 시각별 지표에 도달하는 양이 차이가 있다는 점을 기본으로, 이를 계산에 의해서 프로그램화함으로써 시스템별로 태양광을 capture 할 수 있는 비율을 구하여 시스템간의 상대적인 예상 발전 효율을 비교하였다.

2. 직사광선에 의한 태양광 발전 효율 분석

본 연구에서는 양축 추적식 시스템 / 수평 추적식 / 고정식 시스템의 3가지 시스템에 대하여 각 시스템별로 개연성 있는 가정을 토대로 태양광 발전을 할 수 있는 효율이 얼마나 되는지를 계산하고, 시스템 간에 발전 효율의 비교 및 실제 태양광 발전소의 발전량과의 차이점을 분석하였다.

2.1. 일사량

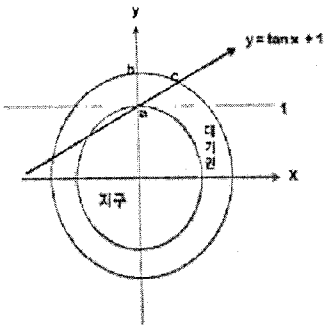
일출, 일몰시에는 일사량이 낮고, 정오경에 일사량이 높은데, 이 두 시점간에 가장 큰 조건의 차이는 '태양광이 통과하는 대기권의 길이'라는 점이다. 따라서 본 연구에서는 이 조건의 차이 즉 태양이 지표에 도달하기까지 통과한 대기권의 길이를 변수로 태양광 발전 효율을 분석하였다. '일사량은 태양광이 통과한 길이에 반비례' 하는 것으로 가정하였으며, 이에 사용되는 반비례 상수로 그림 1 과 같이 대기권의 수직 길이 정도인 지구 반지름의 0.2 % 로 정하였다.

따라서 아래의 식에서 대기권의 방정식은 식 (1)과 같고, 태양의 고도 각이 x 도일 때 대기권에서의 y좌표는 식 (2) 와 같다. 이 때 태양광선이 통과하는 대기권의 길이(그림1에서 $\overline{ac}$)는 식 (3)과 같다. 여기에서 구해진 대기권의 길이와 대기권의 수직 길이의 비율($\overline{ab}/\overline{ac}$)을 예상 발전 효율로 계산하였다.

$$x^2 + y^2 = 1{,}002^2 \quad (1)$$

$$y = \tan x + 1 \quad (2)$$

$$z = \sqrt[2]{x^2 + (y-1)^2} \quad (3)$$



<그림 1> 태양이 통과하는 대기권의 길이

2.2. 발전 효율

태양광이 태양 전지에 수직으로 입사되는 경우 태양광이 발전에 기여하는 양은 그 때의 태양광의 세기와 같다고 가정하였으며, 태양 전지가 태양을 향하지 않을 때에는 태양전지의 발전 효율이 감소될 것이라 예상하고, 그 감소되는 비율을 태양광과 전지의 방향이 이루는 각도의 코사인 값에 비례한다고 가정하였다.

2.3. 분석 대상 지역 선정 및 발전 시간 분석

본 연구에 대한 분석 대상 지역을 우리나라의 중위도 근처에서 기상 관측 자료 획득이 용이한 대전으로 선정하였고, 태양의 운동 및 위치와 관련한 자료는 표 1과 같다 [1,2].

<표 1> 대전지역 일출/일몰/남중 고도 자료

월	일출 시각	일출 각	남중 시각	남중 고도	일몰 시각	일몰 각	일조 시간
1월	7:42	117	12:36	31	17:30	242	9:48
2월	7:27	111	12:44	38	18:02	251	10:35
3월	6:51	95	12:41	49	18:31	264	11:40
4월	6:08	81	12:32	60	18:57	279	12:05
5월	5:31	68	12:27	70	19:23	291	13:52
6월	5:13	60	12:29	76	19:46	299	14:33

3. 시스템별 예상 발전 효율 계산

효율 계산을 위해 낮 길이를 4분을 1구간으로 하여 오전만 계산하고, 월 단위 계산은 매월 7일의 기상 자료를 그 달의 평균으로 가정하고 계산하였으며, 6개월을 계산한 결과 1년간 전체 낮의 길이 구간이 552 구간이 되었다. 따라서 태양이 1년 내내 1 air mass를 통과하여 비출 때의 총 일사량이 552가 되며, 발전 효율은 구해진 값과 552의 상대적인 비율로 판단하였다.

이것은 태양이 연중 대기를 수직으로 비출 때의 예상 발전량과 현실과 같이 일별, 계절별 태양의 고도가 변할 때의 발전량과의 비교인 것이다. 발전 효율을 계산하는 프로그램은 'C 언어'를 사용하였으며, 각 시스템별로 계산한 결과는 다음과 같다.

3.1. 양축 추적 시스템

양 축 추적 시스템은 경사각과 동서각을 동시에 변경할 수 있도록 하여, 태양전지가 항상 태양을 향하도록 추적함으로써, 발전량이 최대가 되게 하는 가장 이상적인 시스템이다. 그림자로 인한 발전효율 감소를 줄이기 위하여 동서 방향과 남북 방향으로 이격 거리를 많이 두어야 한다는 단점이 있지만 발전량을 최대로 할 수 있는 시스템이라는 점에서 선호되고 있는 시스템이다.

가장 이상적으로 실시간 tracking을 하는 시스템을 운영한다는 가정 하에 예상 발전 효율은 44.7%를 얻을 수 있었다. 표 2에서 총 발전량이 246.7로 계산되었는데, 낮의 길이 전체가 552 이므로 두 수치간의 비율이 발전 효율이 된다고 할 수 있다.

<표 2>양축추적 시스템의 발전 효율

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	계	비율
4시	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1%
5시	0.0	0.0	0.0	0.4	1.4	2.1	3.9	1.6%
6시	0.0	0.2	0.8	2.4	3.9	4.8	12.1	4.9%
7시	0.9	1.7	2.9	4.7	6.3	7.3	23.7	9.6%
8시	2.4	3.4	5.0	6.9	8.6	9.5	35.9	14.5%
9시	4.0	5.2	7.0	9.0	10.6	11.5	47.3	19.2%
10시	5.5	6.9	8.8	10.8	12.3	13.1	57.5	23.3%
11시	7.0	8.5	10.5	12.4	13.6	14.2	66.2	26.8%
계	19.7	26.0	35.0	46.6	56.8	62.7	246.7	100%
비율	8.0%	10.5%	14.2%	18.9%	23.0%	25.4%	100%	44.7%

3.2. 수평추적 시스템

수평추적 시스템은 남북 방향으로 수평한 축을 기준으로 태양의 동서 방향만 추적할 수 있는 시스템이다. 남북 방향은 수평이므로 동서 방향의 그림자만 태양 전지의 발전 효율 감소에 영향을 주는 관계로, 양축 추적 시스템에 비하여 한정된 면적에 많은 양을 설치할 수 있고, 발전 효율도 높기 때문에 선호되고 있는 시스템이다.

계산 결과 수평 축적식의 효율은 40.9%이며, 양축 추적 시스템과 비교 시 91.5%의 효율을 얻을 수 있었다.

<표 3> 수평 추적 시스템의 예상 발전 효율 분석

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	계	비율
4시	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16	0.1%
5시	0.00	0.00	0.00	0.37	1.40	2.05	3.82	1.7%
6시	0.00	0.20	0.84	2.36	3.80	4.61	11.82	5.2%
7시	0.88	1.61	2.81	4.62	6.21	7.10	23.23	10.3%
8시	2.22	3.22	4.74	6.72	8.41	9.36	34.67	15.4%
9시	3.39	4.56	6.37	8.51	10.30	11.30	44.43	19.7%
10시	4.08	5.42	7.59	9.93	11.81	12.83	51.64	22.9%
11시	4.13	5.68	8.30	10.90	12.87	13.87	55.76	24.7%
계	14.7	20.69	30.66	43.41	54.80	61.28	225.5	100%
비율	6.5%	9.2%	13.6%	19.2%	24.3%	27.2%	100%	40.9%

3.3. 고정식 시스템

고정식 시스템은 고장이 없고, 설치 단가가 낮다는 점과 설치량을 최대로 할 수 있다는 장점 때문에 선호되고 있는 시스템이다. 고정식 시스템은 태양전지를 남향으로 하고, 북쪽이 높게 일정한 경사각을 이루게 설치하는 시스템으로, 대전 지역의 경사면 일사량 조사 결과 경사각이 30도일 때 일사량이 가장 높은 것으로 나왔다[3].

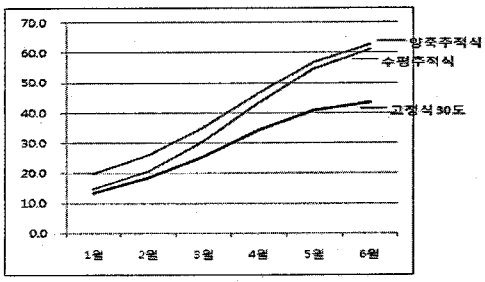
따라서 본 연구에서는 경사각이 30도인 고정식 시스템에 대하여 분석하였다. 고정식 시스템에서의 효율은 31.8%로써 양축 추적식 대비 71.1%의 효율을 얻을 수 있었다.

<표 4> 고정식 시스템의 예상 발전 효율 분석

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	계	비율
4시	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
5시	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
6시	0.00	0.03	0.09	0.27	0.48	0.55	1.43	0.8%
7시	0.21	0.42	0.77	1.47	2.16	2.49	7.53	4.3%
8시	0.95	1.50	2.35	3.72	4.94	5.54	19.0	10.8%
9시	2.26	3.26	4.72	6.71	8.30	9.05	34.3	19.6%
10시	3.99	5.45	7.48	9.80	11.41	12.08	50.2	28.6%
11시	5.84	7.65	10.02	12.22	13.42	13.75	62.9	35.9%
계	13.25	18.32	25.43	34.21	40.73	43.46	175.4	100%
비율	7.6%	10.4%	14.5%	19.5%	23.2%	24.8%	100%	31.8%

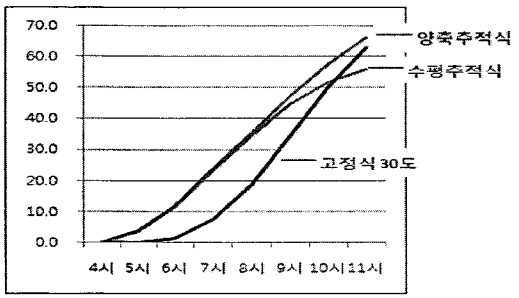
3.4 시스템간의 계절별 및 시간별 효율 비교

상기의 결과를 종합하여 예상 발전 효율을 비교해 보면 다음과 같다.



<그림 2> 시스템별 월별 효율 비교

그림 2에서와 같이 월별로 비교하면 양축 추적 시스템이 가장 높고, 수평 추적 시스템이 겨울에는 고정식 시스템과 비슷한 효율을 내고, 여름에는 양축 추적 시스템과 비슷한 효율을 내는 결과를 얻을 수 있었다.

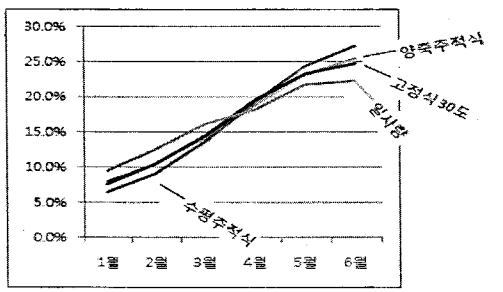


<그림 3> 시스템별 시간별 효율 비교

그림 3은 시간별 효율 비교를 나타내며, 수평 추적 시스템이 아침에는 양축 추적 시스템과 거의 같은 효율을 내고, 정오경에는 오히려 고정식 시트템보다 효율이 낮은 결과가 나왔다.

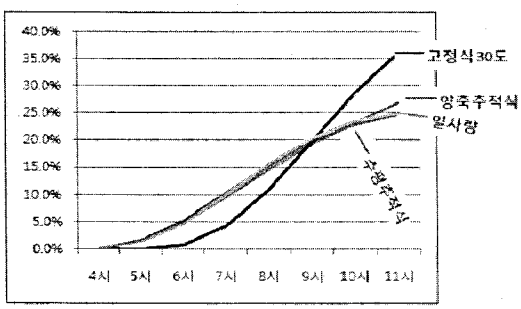
4. 일사량 및 실제 태양광 발전소의 발전량과의 비교

비교를 위하여 사용된 일사량 값은 기상청에서 제공하는 대전 지역의 수평면 일사량을 측정한 결과이며, 2007/2008년의 2년간의 상반기 자료를 평균하고, 오전과 오후의 자료도 평균하여 사용하였다[1]. 일사량 자료는 MJ/m^2 단위이므로, 발전 효율 분석 자료와의 비교를 위하여, 두 자료 공히 월별, 시간별 자료들을 구성비로 변경하여 비교해 본 결과는 다음과 같다.



<그림 4> 시스템별 월별 예상 발전 효율과 일사량

월별 발전량 비율과 일사량과의 관계를 보면, 겨울에는 일사량 자료가 높고, 여름에는 예상 발전량 자료가 높게 나타났다. 또한 월별 발전량이 가장 많이 차이가 나는 시스템은 수평 추적식인 것으로 나타났으며, 고정식과 양축 추적 시스템에서는 월별 발전량 비율이 거의 동일한 수준인 것으로 나타났다.



<그림 5> 시스템별 시간별 예상 발전효율과 일사량

시간별 발전 효율 분석 결과와 일사량을 비교해 보면, 고정식 시스템이 일중 발전량 편차가 가장 심한 것으로 나타났고, 양축 추적시스템과 수평 추적 시스템은 일중 편차가 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 일사량 그래프와 가장 유사한 그래프를 나타내는 것은 수평 추적식 시스템인 것으로 결과가 나왔다.

<표 5> 태양광 발전소의 발전량과 분석 결과의 비교

시스템	계산상 예상 발전	양축추적식 대비	발전시간/일	양축 추적식 대비	비 고
양축추적식	44.70%	100.0%	4.59	100.0%	4개 평균
수평 추적식	40.90%	91.5%	4.32	94.1%	1 개
고정식	31.80%	71.1%	3.72	81.0%	10개 평균

현재 운영중인 발전 사업에서 2006년 1년간 발전량과 본 논문에서 분석된 시스템별 예상 발전량을 비교한 결과는 표 5와 같다. 실제 태양광 발전소에서의 시스템별 효율 차이가 본 논문에서 분석한 결과보다 낮은 것으로 나왔다.

5. 결론

예상 발전 효율 분석 결과와 일사량을 비교한 결과, 일사량은 계절별, 시각별 편차가 예상 발전 효율 분석에서 계산한 자료보다 낮게 나왔다. 또한 예상 발전 효율 분석과 실제 발전량의 총량 비교에서도 이와 동일한 결과가 나왔다. 이것은 일사량이나 현실의 발전소는 직사광선뿐만 아니라 산란광선에도 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

또한 양축 추적 시스템이라도 태양을 완벽하게 추적할 수 있는 각도가 되지 않는 시스템이 있으며, 추적 인터벌이 큰 경우에도 효율이 떨어지고, array 간의 간격이 좁아서 그림자 영향으로 인한 발전 효율의 감소도 있을 수 있다. 그러므로 계산상 예상 발전 효율은 가장 이상적인 시스템을 구축했을 때 낼 수 있는 최대 효율이라고 생각하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

이러한 발전 효율 감소 요인에 대하여도 검토가 필요한 것으로 판단되며, 산란광 효과에 따라 지표에 도달하는 태양광 양의 변화도 분석하여 분석의 결과에 미치는 요인으로 추가하고, 분석을 위한 가정들에 대한 검증 과정을 거친다면 이론적인 체계화가 가능할 것으로 생각된다.

향후 경사 단축 시스템, array 추적 시스템, 고정 가변형 등 여러 가지 시스템에 대한 분석을 추가하고, 그 결과를 토대로 종합적인 결론을 내리고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] 기상청 홈페이지 http://minwon.kma.go.kr/index.jsp
[2] 한국천문연구원 홈페이지 http://www.kao.re.kr/Knowledge/solar_altaz.aspx
[3] 해양수산부 항로표지 업무 편람 2006