

반고정식 PV 시스템의 운영 스케줄 도출 및 그에 따른 발전 효율 변화 고찰

곽인규 · 문선혜 · 허정호[†]

서울시립대학교 건축공학과

Optimal Operation Schedule of Semi-Fixed PV System and Its Effect on PV Power Generation Efficiency

Kwak, In-Kyu · Mun, Sun-Hye · Huh, Jung-Ho[†]

Department of Architectural Engineering, University of Seoul

[†]Corresponding author: huhj0715@uos.ac.kr

Abstract

The amount of solar irradiation obtained by a photovoltaic (PV) solar panel is the major factor determining the power generated by a PV system, and the array tilt angle is critical for maximizing panel radiation acquisition. There are three types of PV systems based on the manner of setting the array tilt angle: fixed, semi-fixed, and tracking systems. A fixed system cannot respond to seasonal solar altitude angle changes, and therefore cannot absorb the maximum available solar radiation. The tracking system continually adjusts the tilt angle to absorb the maximum available radiation, but requires additional cost for equipment, installation, operation, and maintenance. The semi-fixed system is only adjusted periodically (usually seasonally) to obtain more energy than a fixed system at an overall cost that is less than a tracking system. To maximize semi-fixed system efficiency, determining the optimal tilt angle adjustment schedule are required. In this research, we conducted a simulation to derive an optimal operation schedule for a semi-fixed system in Seoul, Korea (latitude 37.5°). We implemented a solar radiation acquisition model and PV generation model on MATLAB. The optimal operation schedule was derived by changing the number of tilt angle adjustments throughout a year using a Dynamic Algorithm. The results show that adjusting the tilt angle 4 times a year was the most appropriate, and then, generation amount of PV system increased 2.80% compared with the fixed system. This corresponds to 99% compared to daily adjustment model. This increase would be quite valid as the PV system installation area increased.

Keywords: PV 시스템(PV system), 반고정식 PV 시스템(Semi-fixed PV system), 설치 각도(Tilt angle), 최적화(Optimization)

기호설명

E_o : 전 일사량(W/m²)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.6, pp.69-77, December 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.6.069>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 31 October 2017

Accepted: 21 December 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- E_b : 직달 일사량(W/m²)
 E_d : 확산 일사량(W/m²)
 K_T : 청명계수(Clearness Index)
 $K_{T,Clear}$: 청명일 기준 계수
 K_{DS} : 산란계수
 E_{POA} : 어레이 표에 도달하는 총 입사량(W/m²)
 POA : 모듈 어레이 표면, Plane of Array
 R_b : 경사면 계수
 β : 설치각도(°)
 ρ : 반사율
 I_{sc} : 단락전류(A)
 I_{mp} : 최대 전력점 전류(A)
 V_{oc} : 개방전압(V)
 V_{mp} : 최대 전력점 전압(V)
 α_{Isc} : 표준화 I_{sc} 온도 계수(A/°C)
 α_{Imp} : 표준화 I_{mp} 온도 계수(A/°C)
 β_{Voc0} : 표준 조건 개방 전압 온도 계수(V/°C)
 β_{Vmp0} : 표준 조건 최대 전압 온도 계수(V/°C)
 C_0, C_1 : I_{mp} 실험 계수
 C_2, C_3 : V_{mp} 실험 계수
 N_s : 모듈 직렬 셀 스트링 내 셀 개수
 E_e : 유효 일사량
 k : 볼츠만 상수. 1.38066e-23 (J/K)
 q : 기본전하. 1.60218e-19 (coulomb)
 T_0 : 기준 모듈 온도, 25°C
 f_d : 모듈에 의해 확산되는 일사량 비율
 T_c : 모듈 내부 온도
 T_m : 모듈 후면 온도(°C)

E_o = 기준 일사량(1,000 W/m²)

ΔT : 기준 일사량에서 모듈 후면과 내부 사이의 온도 차

WS : 풍속

AM_a = 기단(Absolute air mass)

a, b = 모듈 온도변화 특성 계수

1. 서론

화석 에너지 고갈과 지구 온난화 등 환경 문제가 심화되며 신재생 에너지 발전의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 이중 태양광 발전 시스템(이하 PV 시스템)의 기술적 잠재량은 7,451 GW으로 이는 원전 7351기에 해당한다. PV 시스템의 기술적 잠재량은 2035년까지 9,939 GW까지 늘어날 것으로 예상되고 있으며 2022년을 기점으로 발전단가가 생산단가를 추월하는 그리드 페널티에 도달하여 정부 보조금 없이 완전 경쟁 상태에서도 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 예상된다¹⁾.

이러한 PV 시스템의 전력 생산량을 결정하는 주요 요인은 단일 모듈의 발전 효율과 PV 시스템 패널에 도달하는 일사량이다. 이중 일사량을 최대로 하기 위해서는 패널이 설치된 어레이의 설치 각도가 중요하며 이 어레이 설치 각도 설정법에 따라 PV 시스템을 고정식, 추적식 그리고 반고정식 시스템으로 구분할 수 있다. 고정식 시스템의 경우 운영을 위한 추가 동력을 요구하지 않지만 최대 일사량을 확보하지 못한다. 반면에 추적식은 정해진 주기와 방식으로 태양의 위치를 추적하여 상대적으로 많은 일사량을 확보할 수 있으나 추적을 위한 동력원의 설치와 운용, 유지 보수 등을 위한 추가 비용이 요구된다. 반고정식은 고정식과 추적식의 중간 성격의 것으로 연간 수회의 각도 조정만을 요구한다.

수년 간, PV 시스템의 최대 일사 획득을 위한 설치 각도에 대해 많은 연구가 이루어져왔다.

국내에서 진행된 연구의 경우^{2,3,4)} 시뮬레이션 프로그램¹을 통해 각지의 고정식 PV 시스템의 최적 각도와 고정 가변형 시스템의 월별, 계절별 최적 각도, 그때의 고정식 대비 발전량 증가에 대해 고찰했다. 그 결과, 국내 대부분의 지역이 30°내외의 고정식 최적 설치 각도를 가지는 것을 알아냈으며, 계절별, 월별 각도 조정을 하는 반고정식 시스템을 통해서도 고정식 대비 5~10% 가량의 발전량 증가를 이룰 수 있는 것으로 나타났다.

해외에서 진행된 연구의 경우^{5,6)} 국내와 비슷하게 위도와 기후에 따른 지역별 최적 각도와 월별, 계절별 각도 조정을 통한 고정 가변형 PV 시스템의 효율 증가를 고찰 하였다. 그중 특기할 만한 연구는 사우디아라비아와 진행된 연구로 시뮬레이션을 통해 반고정식 PV 시스템의 최적 변경 횟수 및 운영 스케줄을 도출하였고, 그 결과 연간 2~6회의 조정만으로도 매일 조정하는 경우의 99%에 근접하는 생산량을 보인다는 결과를 얻어냈다.

이와 같이 연구 결과를 분석한 결과, PV 시스템의 어레이 설치 각도 조정을 통해 유의미한 발전량 증가를 가

¹ Energy +, Trnsys 등의 프로그램이 주로 사용되었다.

저울 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 국내의 경우, 반고정식 PV 시스템을 대상으로 최적 변경 시점과 그때의 최적 각도를 구하는 연구는 진행되어있지 않았다.

이에 본 연구는 한국의 서울 지역을 대상으로 반고정식 시스템의 설치 각도 조정 일정을 검토하여 최적 변경 횟수와 그에 맞는 운영 스케줄을 제시하고 그에 따른 PV 시스템의 효율 변화를 고찰하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 시뮬레이션을 통해 고정가변형 PV 시스템의 최적 운영 스케줄을 도출하였다. 이를 위해 패널 일사량 예측 모델과 PV 시스템 발전 예측 모델을 MATLAB 상에 구현하였으며, 최적 운영 스케줄 도출을 위해서는 다이나믹 프로그래밍 기법을 활용하였다.

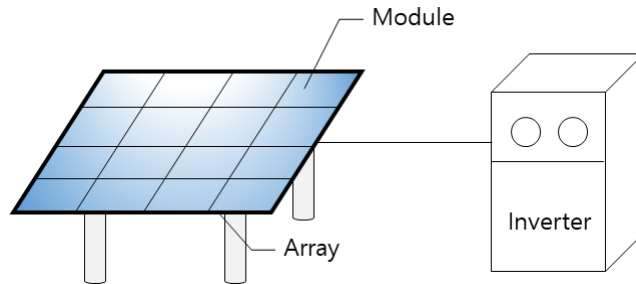


Fig. 1 CPV system configuration

PV 시스템은 Fig. 1과 같이 모듈과 모듈이 설치되는 어레이, 그리고 모듈에서 생산되는 직류 전원을 사용 가능한 교류 전원으로 바꿔주는 인버터로 구성된다. 따라서 PV 시스템의 발전량은 모듈에서 생산되고 인버터를 거친 전기의 양으로 생각할 수 있다. 현재 사용되고 있는 인버터의 효율은 대부분 98% 이상으로 조사되었으며, 본 연구는 어레이 설치 각도 변경 법에 따른 전체 시스템의 발전량 변화를 보기 위한 것이기 때문에 인버터 효율을 100%로 가정하여 인버터의 영향은 제외하였으며, 모듈에서 출력되는 전기를 곧 발전량으로 가정하였다.

2.1 PV 시스템 발전량

PV 시스템의 발전량 산출을 위해서는 패널에 도달하는 일사량을 산출해야한다. 일사량 산출을 위한 첫 번째 단계는 수평면에 도달하는 전일사를 직달과 확산 성분으로 분리하는 것이다. 사전 연구⁷⁾에 따르면, 일기에 의한 왜곡제거를 위해서는 청천공 상태를 기준으로 일사량을 산출하여 고정가변형 PV 시스템의 스케줄을 도출하여야하지만 변경횟수가 10회 이하 일때는 청천공 모델과 청천공·담천공 모델 간 도출된 스케줄의 차이는 미미하였으며 좀 더 정확한 일사량을 예측하여 발전량은 산출하는 것에는 청천공·담천공 모델을 쓰는 것이 적합하였다. 본 연구에서는 연구 대상지역인 동아시아 지역에서 도출된 와타나베 직산분리 모델이 사용되었다¹⁾.

$$E_b = E_o K_{DS} (1 - K_T) / (1 - K_{DS}) \quad (1)$$

$$E_d = E_o K_{DS} (K_T - K_{DS}) / (1 - K_{DS}) \quad (2)$$

두 번째 단계는 직산 분리된 일사량을 바탕으로 어레이 설치 각도에 패널에 도달하는 일사량을 산출하는 것이다. 본 연구에서는 식(7)과 같은 Isotonic Diffuse Model이 사용되었다⁸⁾.

$$E_{POA} = E_b R_b + E_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + E_o \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3)$$

마지막으로 발전량 예측을 위해서는 Sandia Array Performance Model(이하 SAMP)⁹⁾을 사용하였다. SAMP는 미국의 샌디아 국립연구소에서 다년 간의 실증 실험을 바탕으로 개발한 발전량 예측 모델로 여러 검증 연구를 통해 5% 내외의 오차를 보이는 것으로 나타났다¹⁰⁾. 식(8)에서 식(14)는 이 SAMP의 식을 나타낸 것이다.

$$I_{mp} = I_{mp0} (C_0 E_e + C_1 E_e^2) (1 + \alpha_{mp} (T_c - T_0)) \quad (4)$$

$$I_{sc} = I_{sc0} \cdot f(AM_a) \cdot \{ E_b f_2(AOI) + f_d E_d \} \cdot (1 + \alpha_{sc} (T_c - T_0)) \quad (5)$$

$$V_{oc} = V_{oc0} + N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + \beta_{oc} (T_c + T_0) \quad (6)$$

$$V_{mp} = V_{mp0} + C_2 N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + C_3 N_s (\delta(T_c) \ln(E_e))^2 + \beta_{vmp} (T_c - T_0) \quad (7)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (8)$$

$$E_e = I_{sc} / [I_{sc0} (1 + \alpha_{sc} (T_c - T_0))] \quad (9)$$

$$\delta(T_c) = n \cdot k \cdot (T_c + 273.15) / q \quad (10)$$

모듈 내부 온도 예측 식 역시 샌디아 국립 연구소에서 도출한 Module Operating Temperature model을 사용하였다.

$$T_c = T_m + \frac{E_{POA}}{E_o} \Delta T \tag{11}$$

$$T_m = E_{POA} \{e^{a+b \cdot WS}\} + T_a \tag{12}$$

본 연구에서 사용한 모델은 결정형 모듈로 SAMP 적용을 위한 실험 계수들은 샌디아 국립 연구소에서 제공하는 PV 모듈 데이터베이스²의 값들을 사용하였다. Table 1는 모듈의 전기적 특성을 나타낸 표이다.

Table 1 Module electric characteristics

Parameter	Pmax (W)	Vmp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	η (%)
Values	250	250	8.33	37.40	8.89	15.1

2.2 최적 운영 스케줄 도출

반고정형 PV 시스템의 최적 운영 스케줄 도출은 다이나믹 프로그래밍 기법을 사용해 이루어졌다. 다이나믹 프로그래밍 기법은 최적 해를 찾을 때 문제를 부분적으로 분할하여 각 부분의 최적 해를 차례로 구함으로써 전체에 대한 해를 찾는 알고리즘이다. 부분 해를 저장 한 뒤 상호 비교를 통해 더 나은 것만을 채택 해나가기 때문에 반복 작업을 최소화해 시뮬레이션 시간을 줄일 수 있으며, 본 논문에서의 경우와 같이 수학적 형태로 관계가 규명 되어있지만 전수 조사를 하기에는 오랜 시간이 걸리는 경우에 유용하다.

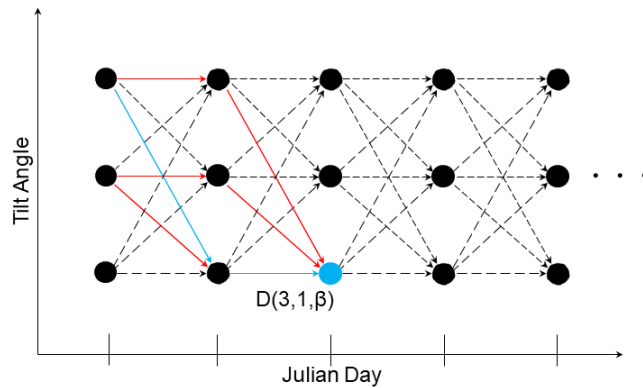


Fig. 2 Comprehension of dynamic algorithm

Fig. 2는 최적 운영 스케줄 도출을 위한 다이나믹 프로그래밍 기법의 적용을 도식화한 것이다. 그림상의 파란 점은 3일째, 설치각 변경 1회, 그리고 그때의 설치 각도 β 를 가지는 고정가변형 PV 시스템을 의미한다. 그림에

² System advisor model database, National renewable energy laboratory, 2017.

서 볼 수 있듯, 이 점은 적색 경로를 거쳐온 값과 청색 경로를 거쳐온 값이 중복되게 된다. 이때 청색 경로의 값이 가장 큰 값이라면 청색 경로의 값이 저장된다. 이것을 365일까지 반복하면 0회 조정한 경우(고정식 최적각도)에서 매일 조정한 경우까지 365가지의 결과 값을 얻게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 3은 위와 같은 스케줄을 적용 했을 때 반고정식의 변경 횟수에 따른 발전량과, 그때의 고정식 대비 증가율을 나타낸 그래프이다. 설치각 변경의 원인인 태양 고도각 변화가 여름을 기준으로 대칭 형태를 나타내기 때문에, 연간 변경 횟수가 홀수가 되는 스케줄은 결과에서 제외하였다. 고정식 PV 시스템의 연간 발전량은 199.7 kWh/m^2 로 분석되었다. 연간 조정 횟수가 증가함에 따라 조정 횟수 6 회까지 고정식 대비 5.83 kWh/m^2 , 2.95%의 발전량이 증가하는 것으로, 매일 최적 각도로 각도를 조정하는 경우는 고정식 대비 3.33%의 발전량 증가치가 나타나는 것으로 분석되었다. 이처럼 조정 횟수 6회까지 증가분이 증가량의 대부분을 차지하였으며, 4회 이후에는 1회당 0.2%내로 증가량이 미미하였다. 따라서 4회 이내의 변경 횟수가 적합할 것으로 분석되며, 추후 반고정식 시스템의 각도 조절을 위한 동력비와 발전량 증가의 비교를 통한 추가적인 비교가 필요할 것으로 사료된다.

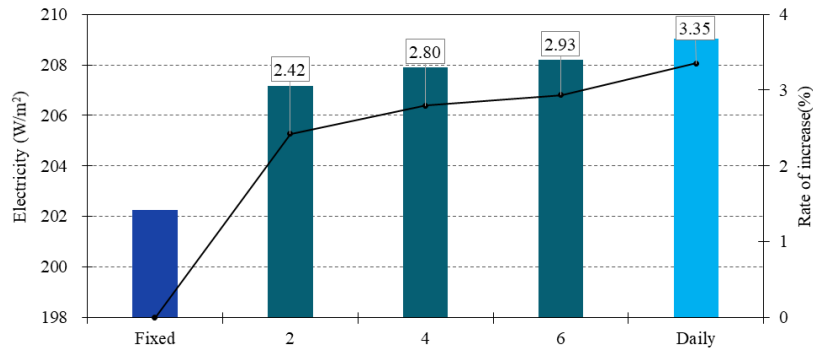


Fig. 3 Amount of electricity generated by the number of changes

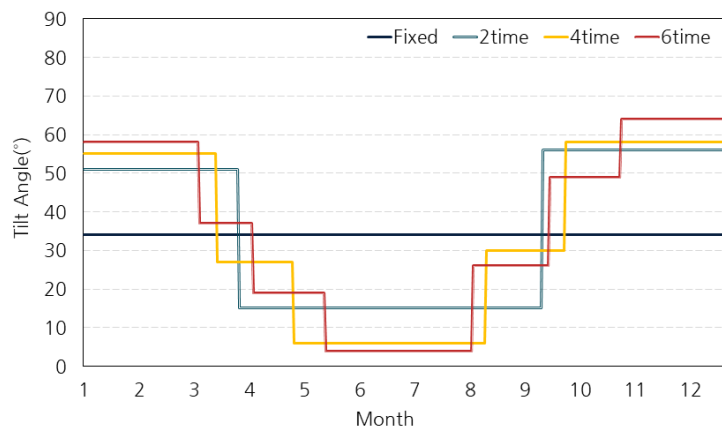


Fig. 4 Derived Operation Schedule

Fig. 4는 위와 같은 방법으로 도출된 고정식 시스템의 최적각도와 반고정식 시스템의 설치 각도 변경 횟수가 2회에서 6회까지 변할 때 운영 스케줄을 나타낸 그래프이다. 고정식 시스템의 최적 각도는 서울지방을 기준으로 34°로 산출되었다. 반고정식 시스템에서의 최적 각도는 여름철에 4°, 겨울철에 64°까지 나타났으며, 변경 시점은 봄철(3~5월)과 가을철(8~10월)로 나타났다. 4회 변경 시의 변경 시점은 3월 중순과 4월 하순, 8월 초순과 9월 중순으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 시뮬레이션 스테디를 통해 반고정식 PV 시스템의 최적 운영 스케줄을 도출하고 그때의 효율 변화를 고찰해보았다. 본 연구의 주요 결과는 아래와 같다.

- (1) 시뮬레이션을 통해 도출된 고정식 PV 시스템의 서울 지역 고정식 최적 각도는 34°였으며, 그때의 연간 발전량은 199.7 kWh/m²이었다.
- (2) 반고정식 시스템의 발전량은 6회까지 고정식 대비 5.83 kWh/m², 2.95%의 발전량 증가를 보였으며, 매일 최적 각도로 각도를 조정하는 경우는 고정식 대비 3.33% (6.78 Wh/m²)의 발전량 증가를 보였다. 6회 조정 이후매일 조정하는 경우까지의 증가분은 0.38%의 지나지 않았으며, 따라서 연간 6회 이내의 조정을 하는 것만으로도 충분한 효과를 낼 것으로 나타났다.
- (3) 도출된 스케줄에 따르면 반고정식 PV 시스템의 설치 각도는 각도 조정횟수 6회 변경 이내에서 여름철 4°, 겨울철 64°이내로 나타났으며, 변경 시점은 3월~5월과 8월~10월로 나타났다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비지원으로 수행되었음(과제 번호: 20143010011910).

REFERENCES

1. Korea Energy Economics Institute. A renewable energy supply statistics, 2015.
2. Kang, S., Lee Y., Hwang J., and Cho, Y. The Analysis of the Renewable Energy Supply Ratio for the School Building Applied PV System, Solar Energy, Vol. 32, No. 2, pp. 50-57, 2012.
3. Kim, D., Shin, U., and Yoon, J., Annual Energy Yield Prediction of Building Added PV System Depending on the Installation Angle and the Location in Korea, Journal of Korea Institute of Ecological Architecture And Environment, Vol. 14, No. 1, pp. 67-74, 2014.
4. Yu, G., Lee, Y., So, J., Seong, S., and Yu, B. The Study on Optimum Installation Angle of Photovoltaic Arrays Using the Expert System, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, pp. 107-115, 2007.
5. Tarek O. K., Makbul A. M. R., and Yusuf, A. A., On the Estimation of the Optimum Tilt Angle of PV Panel in Saudi Arabia, Renewalble and Sustainable Energy Reviews, Vol. 65, pp. 626-634, 2016.

6. Kwak, I., Mun, S., Park, K., and Huh, J., Optimal Operation Schedule for Semi-fixed PV System, 9th IEEEES, 2017.
7. Duffie, J. and Beckman, W., Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition. New York, John Wiley & Sons Inc, 2006.
8. Milan, D. and Vladimir, N., Comparison of Optimum Tilt Angles of Solar Collectors Determined at Yearly, Seasonal and Monthly Levels, Energy Conversion and Management, Vol. 97, pp. 121-131, 2015.
9. David L., William E., and Boyson, Jay K, Sandia pv array performance model, Sandia National Laboratories, 2004.
10. Jinqing P., Lin L., Hongxing Y., and Tao M., Validation of the Sandia Model with Indoor and Outdoor Measurements for Semi-transparent Amorphous Silicon PV Modules, Renewable Energy Vol. 80, pp. 316-323, 2015.