

# PSA 알고리즘에 의한 태양광 추적시스템의 효율분석

(Efficiency analysis of PV tracking system with PSA algorithm)

백정우\* · 고재섭 · 최정식 · 장미금 · 강성준 · 정동화

(Jung-Woo Back\* · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Mi-Geum Jang · Sung-Jun Kang · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

This paper analyzes efficiency of photovoltaic(PV) tracking system using position solar algorithm(PSA). Solar location tracking system is needed for efficiently and intensively using PV system independent of environmental condition.

PV tracking system of program method is presented a high tracking accuracy without the wrong operating in rapidly changed insolation by the clouds and atmospheric condition.

Therefore, this paper analyzes efficiency of PV system using PSA algorithm for more correct position tracking of solar. Also, controlled altitude angle and azimuth angle by applied algorithm is compared with data of korea astronomy observatory. And this paper analyzes the tracking error and proves the validity of applied algorithm.

**Key Word** : PSA Algorithm, PV Tracking, Program Method, Solar Position

## 1. 서 론

태양광 발전은 화석연료를 사용하는 다른 발전 방식과는 다르게 환경 친화적으로서 대기오염이나 소음의 발생이 없고, 에너지원이 무한하여 고갈의 염려가 없다는 것이 큰 장점이다. 기술적으로 규모에 의해 발전량은 변하지만 발전효율은 규모에 관계없이 일정하기 때문에 소규모에서 대규모 부하까지 대응할 수 있고, 특히 발전시간이 침두부하가 걸리는 시간과 일치하므로 하절기 침두부하를 줄여 주는 부가효과가 있다. 또한 태양광이 닿는 곳이면 전기를 필요로 하는 어느 장소에서도 발전할 수 있고, 소형으로 만들어 휴대할 수도 있으며, 연료의 공급 없이 20년 이상 사용이 가능하다. 뿐만 아니라 운전, 유지관리 및 보수비용의 현저한 감소로 인해 대체에너지원으로 활발한 연구가 진행되고 있다[1].

그러나 에너지원이 태양광이므로 야간이나 우천 시에 사용이 불가능하고 일사량에만 의존하므로 자연환경에 의한 변동이 많고, 에너지원이 저밀도라 대 전력을 얻기 위해서는 큰 면적이 필요하다는 단점이 있다. 그리고 현재 태양전지의 변환효율이 상용제품의 경우 14~24[%] 정도로 낮고 태양광 발전 시스템의 총 설비비 중 70[%] 이상이 태양광 전지가 차지하고 있다. 따라서 기존의 전기설비에 대해 발전단가가 높아 경제성을 갖추기 위해서는 태양전지 재료의 성능향상, 주변장치의 효율 증대 및 관련분야에 대한 연구가 더욱 활발히 진행

되어야 한다[2][3].

외부의 별다른 조건이나 환경에 관계없이 효율적이고 집약적으로 태양광을 이용하기 위해서는 태양의 위치를 추적하는 태양위치 추적시스템이 필요하다. 태양을 추적하는 방식에는 추적 신호의 생성방식에 따라 크게 설치장소의 위도 및 경도와 시간정보에 의해 태양위치를 계산하는 프로그램 방식과 광센서에 의한 센서방식 및 프로그램과 센서방식을 혼합한 하이브리드 방식으로 분류된다.

이 중, 프로그램 방식은 날짜와 시간에 따른 태양광의 방위각, 고도각을 미리 기억시켜 놓거나 컴퓨터로 계산된 값에 의해 방위각, 고도각을 조절하는 개루프 방식이다. 이는 구름이나 기상조건의 급격한 변화에도 오동작 없이 비교적 높은 추적 정확도를 나타낸다 [4]-[6].

따라서 본 논문에서는 보다 정확한 태양의 위치추적을 위해 PSA(Position Solar Algorithm)를 태양광 발전 시스템에 적용하여 발전효율을 분석하였다. 또한 적용된 알고리즘에 의해 제어된 고도각 및 방위각과 한국천문연구원의 데이터를 비교하여 추적 오차를 분석하여 적용된 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

## 2. 태양의 위치 계산

태양전지의 발전량은 입사 광량에 비례하므로 같은 외부 환경에서도 태양전지가 태양광 법선 방향으로 위치할 때

발전량이 최대가 된다. 이처럼 태양전지가 태양광에 법선 방향으로 위치하기 위해서는 현재 시간에 따른 태양의 위치에 대한 정보가 필요하다. 지구가 매일 1°씩 반시계 방향으로 태양을 공전하면서, 자전축은 23.45° 기울어져 서에서 동으로 자전한다. 이러한 현상으로 인해 태양의 방위각 및 고도를 계산하기 위해서는 계산 대상 장소의 위도와 경도, 날짜, 시간이 필요하며 이로부터 적위, 균시차, 진 태양시, 태양의 시간각 등을 계산하여야한다.

적위는 지구의 중심축과 태양의 중심 축 으로부터 일직 선으로 생기는 광선과 지구의 적도면 사이에 형성된 각으로  $\delta$ 로 표현할 수 있으며, 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta = & 0.322003 - 22.9711\cos(t) - 0.14398\cos(3t) \\ & + 3.946380\sin(t) + 0.019334\sin(2t) \\ & + 0.059280\sin(3t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $t$ 은 일 각을 나타낸다. 적위는 지구의 자전축이 23.45° 기울어져 있어서 매일 변하며, 양극단 사이에서  $\pm 23.45^\circ$ 로 바뀌고 북쪽일 때가 양의 값을 가진다.

태양의 시간각은 관측자 즉, 태양 전지판이 설치되어 있는 현지 자오선을 지난 후 시간권 사이의 각으로써 남점에서 서쪽방향으로 돌며 켄 크기를 시간각( $\omega$ )이라고 하며 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega = & (T_{AS} - 12) \times 15^\circ \\ = & \left( T_{STD} + \frac{L_{ST} - L_{LOC}}{15} + EOT - 12 \right) \times 15^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

$T_{AS}$  : 진태양시,  $T_{STD}$  : 지방표준시,  $L_{ST}$  : 표준자오선의 경도,  $L_{LOC}$  : 대지의 경도,  $EOT$  : 균시차

균시차( $EOT$ )는 지구가 태양주위를 정원이 아닌 타원의 궤도로 고정함으로써 발생하는 진태양시와 평균태양시 사이의 시간차를 나타내며 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} EOT = & 0.258 * \cos(t) - 7.416 * \sin(t) \\ & - 3.648 * \cos(2t) - 9.228 * \sin(2t) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식 (1)~(3)에 의해 구해진 적위와 시간각을 이용하여, 고도각 및 방위각은 식 (4)과 식 (5)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega) \quad (4)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s}\right) \quad (5)$$

$L$  : 대지의 위도

그림 1은 태양의 고도각과 방위각의 개념을 나타낸 것으로서 태양의 고도각( $\alpha_s$ )은 태양과 수평면이 이루는 각도를 말하고, 방위각( $\gamma_s$ )은 태양이 수평면에 투영된 위치가 정 남쪽과 이루는 각을 말한다.

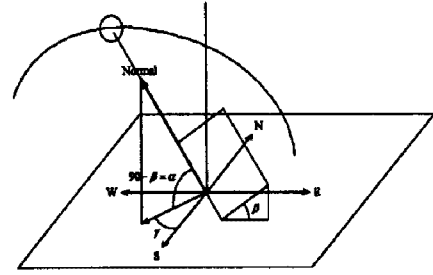


그림 1 태양의 방위각 및 고도.  
Fig. 1 Azimuth and altitude of solar.

### 3. PSA에 의한 태양위치 계산

PSA 알고리즘의 입력은 시간 위치이고, 고려할 항목 중 짧은 시간은 날짜(년, 달, 날짜)와 일반적인 시간(시간, 분, 초)으로 주어진다. 위치는 관측하는 위도와 경도의 각도 값으로 주어진다. 위도는 북반구에 대해 +로 고려하고, 경도는 동쪽에서 시작한다.

율리안 날짜는  $jd$ 로 식 (6)에서 입력 데이터로 계산한다.

$$\begin{aligned} jd = & (1461 \times (y + 4800 + (m - 14) / 12)) / 4 \\ & + (367 \times (m - 2 - 12 \times ((m - 14) / 12))) / 12 \\ & - (3 \times ((y + 4900 + (m - 14) / 12) / 100)) / 4 \\ & + d - 32075 - 0.5 + hour / 24.0 \end{aligned} \quad (6)$$

$m$ 은 월,  $y$ 는 년도,  $d$ 는 월의 날짜,  $hour$ 는 십진수의 일반적인 시간에서 날짜의 시간을 나타낸다. 즉 시간의 합수는 분과 초를 갖으며, 정수 이하의 자리는 무시한다.

이러한 표현은 Fliegel과 Van Flandern(1968)이 제시한 것과는 마지막 2 term 동안은 차이가 난다. 이 term의 덧셈(addition)은 주어진 순간의 시간에 대하여 십진수의 율리안 날짜의 계산을 가능하게 한다. Fliegel과 Van Flandern의 원래의 표현에 따라, Gregorian이나 proleptic Gregorian에서 BC 4800년 3월 1일 이후의 날짜에서 대해서는 유효하다.

태양의 황도좌표 율리안 날짜로부터 식 (7) ~ 식 (12)을 이용하여 계산된다(모든 라디안 각도에서).

$$n = jd - 2451545.0 \quad (7)$$

$$\Omega = 2.1429 - 0.0010394594 \times n \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L(\text{mean longitude}) \\ = & 4.8950630 + 0.017202791698 \times n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} g(\text{mean anomaly}) \\ = & 6.2400600 + 0.0172019699 \times n \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} l(\text{ecliptic longitude}) = & L + 0.03341607 \times \sin(g) \\ & + 0.00034894 \times \sin(2g) \\ & - 0.0001134 - 0.0000203 \\ & \times \sin(\Omega) \end{aligned} \quad (11)$$

$$ep(\text{obliquity of the ecliptic}) = 0.4090928 - 6.2140 \times 10^{-9} \times n + 0.0000396 \times \cos(\Omega) \quad (12)$$

황도에서 하늘 좌표까지의 변환은 표준 삼각법으로 가능하며 식 (13), 식 (14)으로 나타낼 수 있다.

$$ra(\text{right ascension}) = \tan^{-1} \left[ \frac{\cos(ep) \times \sin(l)}{\cos(l)} \right] \quad (13)$$

$$\delta(\text{declination}) = \sin^{-1}[\sin(ep) \times \sin(l)] \quad (14)$$

조심해야 할 것은 천체가 지평선에 오름을 적절하게 계산하여야 한다. 식 (13)에서 0 과  $2\pi$  사이 값을 갖는다. 천체에서 수평 좌표까지의 변환은 식 (15) ~ 식 (21)을 통해 얻을 수 있다.

$$gmst = 6.6974243242 + 0.0657098283 \times n + hour \quad (15)$$

$$lmst = (gmst \times 15 + Long) \times (\pi / 180) \quad (16)$$

$$\omega(\text{hour angle}) = lmst - ra \quad (17)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}[\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\delta) \sin(\Phi)] \quad (18)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{-\sin(\omega)}{\tan(\delta) \cos(\Phi) - \sin(\Phi) \cos(\omega)} \right] \quad (19)$$

$$Parallax = \frac{EarthMeanRadius}{AstronomicalUnit} \times \sin(\theta_2) \quad (20)$$

$$\theta_2 = \theta_2 + Parallax \quad (21)$$

지구의 일반적인 반지름과 태양과의 거리는 다음 식 (22) 과 식 (23)으로 나타낼 수 있다.

$$EarthMeanRadius = 6371.01 \text{ km} \quad (22)$$

$$AstronomicalUnit = 149597890 \quad (23)$$

#### 4. 실험결과 및 분석

그림 2는 PSA 알고리즘을 적용한 양측 태양광 발전 시스템의 고도각과 방위각의 측정을 위한 사진을 나타내고 있다. RS-232 통신을 통해 현재 제어되고 있는 방위각과 고도각의 데이터를 취득하여 한국 천문연구원의 데이터와 비교 분석하였다.

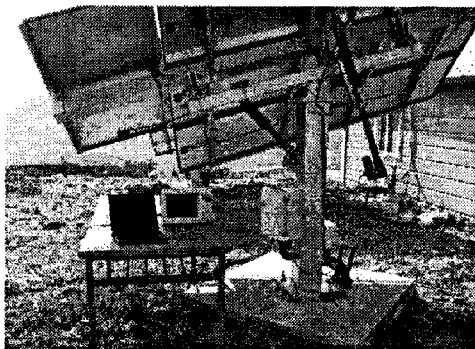


그림 2 데이터 측정을 위한 실험  
Fig. 2 Experiment for data measurement

표 1은 방위각에 대한 비교 데이터를 나타내고 있으며, 그림 3은 이를 도식화하여 나타낸 것이다.

표 1 방위각의 비교 데이터  
Table. 1 Comparison data of azimuth

시간 (시)	방위각(°) (한국천문연구원)	방위각(°) (제어값)	방위각(°) (오차값)
7	91.15	91.26	0.11
8	100.05	100.18	0.13
9	110.18	110.32	0.14
10	122.88	123.04	0.16
11	140.17	140.31	0.14
12	163.92	163.98	0.06
13	191.87	191.75	0.12
14	216.63	216.40	0.23
15	234.87	234.60	0.27
16	248.17	247.89	0.28
17	258.6	258.33	0.27
18	267.65	267.38	0.27

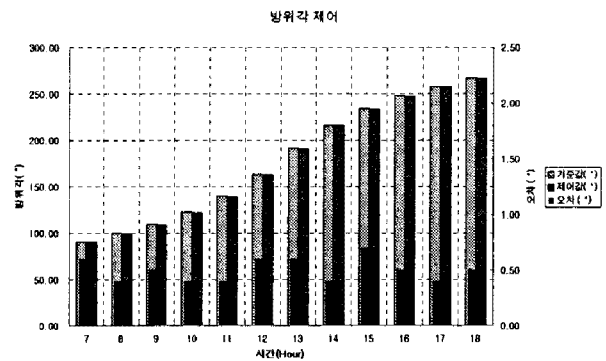


그림 3 방위각 제어의 비교  
Fig. 3 Comparison of azimuth control

표 2는 고도각에 대한 비교 데이터를 나타내고 있으며, 그림 4는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. PSA 알고리즘을 적용한 추적시스템의 방위각과 고도각은 천문연구원의 데이터와 비교할 때, 정확도 99.95% 이상으로 매우 양호하게 나타났다.

표 2 고도각의 비교 데이터  
Table. 2 Comparison data of altitude

시간 (시)	고도각(°) (한국천문연구원)	고도각(°) (제어값)	고도각(°) (오차값)
7	6.9	6.83	0.07
8	19.13	19.04	0.09
9	31	30.89	0.11
10	42.02	41.88	0.14
11	51.25	51.09	0.16
12	57.1	56.89	0.21
13	57.57	57.36	0.21
14	52.47	52.28	0.19
15	43.63	43.48	0.15
16	32.83	32.70	0.13
17	21.08	20.95	0.13
18	8.9	8.77	0.13

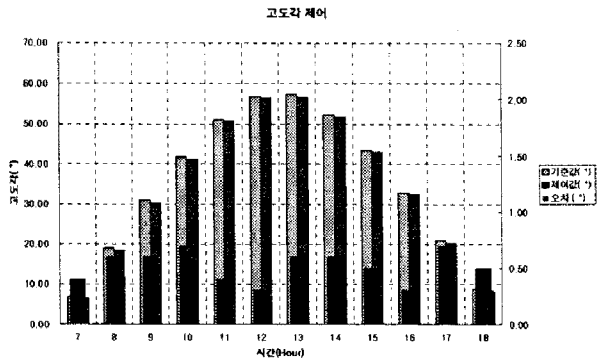


그림 4 고도각 제어의 비교  
Fig. 4 Comparison of altitude control

그림 5~7은 PSA 알고리즘을 적용한 태양광 발전과 일반적인 천문연구원에서 제공하는 데이터를 적용한 태양광 발전을 비교하였다. 그림 5는 인버터 그룹 간의 교류전력, 그림 6은 직류전압 및 직류전류, 그리고 그림 7은 각 알고리즘을 적용하여 발생된 발전량을 나타내고 있다. PSA 알고리즘을 적용한 태양광 발전의 발전량은 187.08[kW]이며, 일반적인 천문 연구원의 데이터를 적용한 발전량은 187.89[kW]로 나타났다. 따라서 PSA 알고리즘을 적용한 결과는 천문연구원의 데이터를 이용한 프로그램 방식과 크게 차이를 나타내지 않았다.

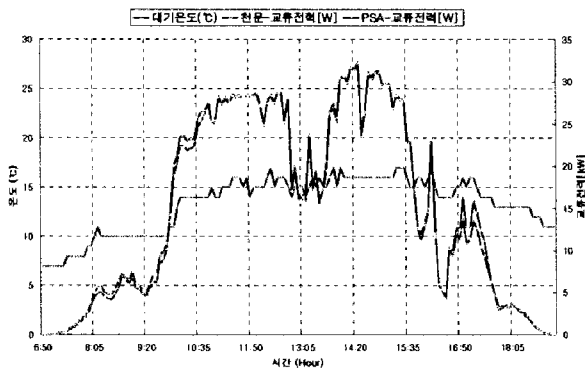


그림 5 태양광 발전의 교류전력 비교  
Fig. 5 AC power comparison of PV system

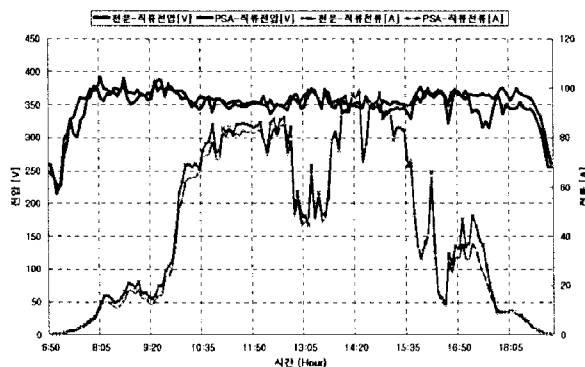


그림 6 직류전압 및 직류전류의 비교  
Fig. 6 Comparison of DC voltage and current

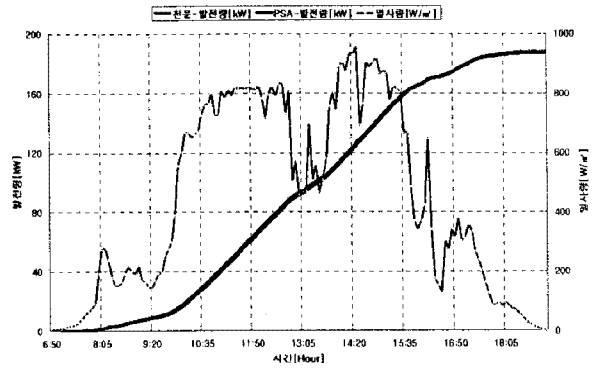


그림 7 발전량 비교  
Fig. 7 Comparison of generation volume

## 5. 결론

본 논문은 PSA 알고리즘을 적용한 태양광 발전의 효율을 분석한 것으로서 천문연구원의 고도각과 방위각의 데이터와 PSA 알고리즘에 의해 제어되고 있는 고도각과 방위각의 데이터를 비교하였다. PSA에 의해 제어된 고도각과 방위각은 천문연구원의 데이터와 99.95% 이상의 정확도를 나타냈다.

또한 PSA 알고리즘과 천문연구원에서 제공된 고도각 및 방위각을 이용한 양측 태양광 발전의 발전량을 비교하였다. PSA에 의한 태양광 발전의 발전량은 187.08[kW], 천문 연구원의 데이터를 적용한 발전량은 187.89[kW]로서 그 차이는 약 0.8[kW]로 매우 유사하게 나타났다. 따라서 본 논문에서 적용한 PSA 알고리즘의 우수한 추종성능을 입증할 수 있으며, 우리나라 태양광 발전소에도 적용이 가능하다.

본 과제(결과물)는 교육과학기술부·지식경제부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

## 참고 문헌

- [1] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 16, pp.46-54, 2001.1.
- [2] H. J. Noh, D. Y. Lee, D. S. Hyun, "An improved MPPT converter with current compensation method for small scaled PV-applications", IEEE IES, Vol. 2, pp.1113-1118, 2002.
- [3] R. Andoubi, A. Mami, G. Dauphin, M. Annabi, "Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using MPPT buck-boost converter", IEEE ICS, Vol. 3, pp.200-205, 2002.
- [4] B. J. Wilkinson, 1983, "The effect of atmospheric refraction on the solar azimuth", Solar Energy 30, 295.
- [5] L. R. Muir, 1983, Comments on "The effect of atmospheric refraction on the solar azimuth", Solar Energy 30, 295.
- [6] H. D. Karbezidis, N. S. Papanikolaou, 1990, "Solar position and atmospheric refraction", Solar Energy 44, 143.