

Control of a Novel PV Tracking System Considering the Shadow Influence

朴基泰* · 崔正植** · 鄭東和†
 (Ki-Tae Park · Jung-Sik Choi · Dong-Hwa Chung)

Abstract - In this paper a novel tracking system is described, regarding the influence of shadow between array, aimed at improving the efficiency of PV tracking system. Comparing with a building site versus capacity power, domestic solar powers have a limited siting. Therefore, each array interferes with the shadow of other arrays. The loss by influence of those shadow can be compensated for by means of control algorithm of the tracking device. The paper suggests a method controlling an altitude for length which is received the shadow influence of PV array. By using an azimuth of current solar position and the length between arrays, the controller of tracking device is able to calculate the length between actual arrays and make a comparison of the shadow length at a specific time with the length between arrays.

When the shadow length is longer than the length between arrays, the controller of tracking device can adjust a position by compensating error altitude of the length between arrays at an altitude of current solar position. In the paper, we develop the control algorithm able to minimize the loss caused by the influence of shadow on the PV tracking system, and compared this with conventional output system. The controller has been tested in the laboratory with proposed algorithm and shows excellent performance

Key Words : Tracker system, Photovoltaic, Shadow influence, Azimuth, Altitude

1. 서 론

석유 자원의 고갈과 산유국들의 생산량 조절 및 정정 불안, 개발도상국들의 석유소비 증가 등의 유가상승으로 전 세계적으로 에너지 안보에 새로운 도전과 변화의 국면에 처해 있다. 또한 기후변화협약 발효에 따른 국제적인 새로운 환경 및 무역질서의 도래에 따라 에너지의 해외 의존도를 낮추고 에너지 안보를 확보하는 방안으로 환경 친화적이고 지속적인 개발이 가능한 대안으로 신·재생에너지 기술이 대두되고 있다. 또한 현재 사용 중인 전기에너지는 원자력, 수력 및 화력 발전에 대부분 의존하고 있는 실정이며, 이러한 발전시스템은 자원고갈, 환경오염 및 생태계 파괴 등 많은 문제를 대두되고 있다. 따라서 문제해결에 대한 대안으로 대체에너지 개발의 필요성이 증대되고 있고, 환경을 오염시키지 않는 무공해 신·재생 에너지인 태양광산업의 발전이 기대되고 있다. 이러한 태양광 발전 시스템의 출력 효율을 높이기 위하여 일반적으로 태양전지 셀 자체의 효율을 높이거나 태양광 발전 제어용 전력변환 시스템의 변환효율 및

MPPT 제어를 하여 높이는 방법, 태양이 항상 법선을 이루면서 태양전지 모듈에 입사되게 하는 추적식 방법 등을 이용하고 있다.[1][2]

태양광 발전 추적 시스템은 지리적인 위치의 위도와 경도를 시간의 변수로 사용하여 태양의 궤적을 추적하는 프로그램 방식과 광센서를 이용하여 광량 차이를 추적하는 센서 방식, 프로그램 방식과 센서 방식을 혼용한 방식 등으로 구성되어 있다. 이러한 태양 추적장치에 의한 발전 방식은 국외의 경우 1MWp 이상의 대규모 태양광 발전소의 발전효율을 높이기 위해 대형 추적식 태양전지 어레이를 사용하고 있다.[3]-[5] 추적시스템은 태양광 발전 적용을 위해 지속적인 기술 개발과 함께 태양 위치 계산의 더 적은 오차가 요구되고 있다. 태양 위치를 계산하기 위한 많은 기법들은 태양광 논문에 발표되고 있으나, 태양의 고도각과 방위각 계산에 있어서 오차는 $\pm 0.01^\circ$ 보다 훨씬 크며 어떤 것은 단지 수 년에 대해서만 타당성을 가지고 있다. 태양위치를 위한 단순한 계산방법은 태양의 적위와 시간 방정식을 계산하는 방법 (Cooper[6], Lamm[7], Spencer[8])과 황도 경도, 경사, 적위, 적경, 천정의 거리, 태양의 방위 등을 계산하는 방법 (Michalsky[9], Pitman and Vant-hull[10], Walraven [11])등이 제시되고 있다.

태양광 발전 추적 시스템에 있어서 모듈을 구성하는 셀에 그림자의 영향이 있으면 셀이 발전하지 않고 Revers bias로 동작하게 되고 결과적으로 hot-spot의 문제로 나타나게 된

* 正 會 員 : 順天大 工大 電氣工學科 工學博士
 ** 正 會 員 : 順天大 工大 電氣工學科 博士課程
 † 교신저자, 正會員 : 順天大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博
 E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr
 接受日字 : 2008年 3月 20日
 最終完了 : 2008年 5月 7日

다.[12] 현재 우리나라는 태양광 발전소의 발전용량 대비 건설예정 부지의 협소화로 인하여 태양광 추적장치의 선정 시 태양의 고도에 따라 그림자 영향을 최소화 할 수 있는 제어 기법의 연구가 절실히 요구되고 있다. 고도의 변화에 따른 그림자의 영향을 최소화 할 수 있는 방법은 태양광 어레이 간의 폭을 크게 함으로서 모듈의 손실을 최소화 할 수 있다. 하지만 부지의 협소로 인한 그림자 영향이 발생 시에는 태양광 추적장치의 고도 각을 실제 고도 각 보다 크게 함으로서 모듈면의 음영을 최소화하여 어레이 출력을 향상시킬 수 있는 연구가 전무한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 그림자 영향에 따른 제어 알고리즘으로부터 이론적인 알고리즘을 제시하고 이에 대한 실험을 통하여 본 논문에서 제시한 역추적 방법과 일반적인 방법을 비교하여 본 논문의 타당성을 입증한다.

2. PV 추적시스템의 모델링

2.1 태양전지 모델링

그림 1은 태양전지의 등가회로를 보여주며 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_c 과 일치하고, 다이오드 포화전류 I_o 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다[13][14].

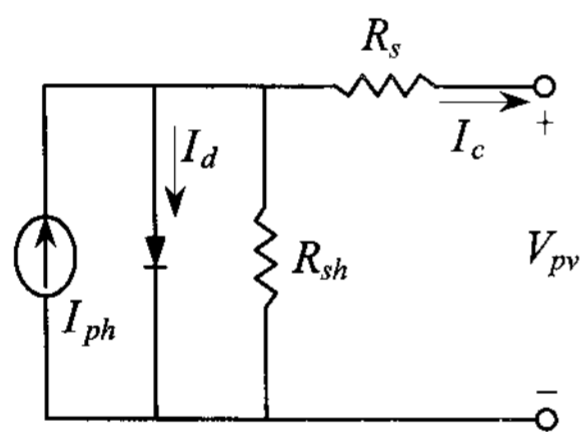


그림 1 태양전지 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_c}{I_o} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서, V_{oc} 는 개방전압, k 는 볼츠만 상수, q 는 전하, I_o 는 포화전류, T 는 태양전지 동작온도[K]를 나타낸다. 또한, 온도의 변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음 식과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} \right] \quad (2)$$

태양전지 모듈은 원하는 전압과 전류를 얻기 위하여 다수의 태양전지 셀을 직·병렬로 연결하여 구성하고, 또한 태양전지 어레이는 이러한 모듈을 다시 직·병렬로 연결하여 제작한다. 태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_{ph} = I_{sc} S_N + I_t (T_c - T_r) \quad (3)$$

$$I_d = I_o \left[e^{\frac{q(V_{pv} + I_c R_s)}{AKT}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (5)$$

$$I_c = I_{ph} - I_d - \frac{V_{pv} + I_c R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

여기서, I_{ph} 는 광전류, S_N 은 단위 일사량, I_t 는 단락전류 온도계수[A/K], I_d 는 다이오드 전류, R_s 는 직렬저항, R_{sh} 는 병렬저항, T_c 는 태양전지 온도[K], T_r 은 태양전지 기준온도[K], A, B 는 제조상수, I_{or} 은 역포화 전류, E_g 는 에너지 밴드갭을 의미한다. 그림 2는 태양전지 어레이의 PSIM 모델을 나타내고 있으며, 그림 3은 PSIM으로 구현한 태양전지 어레이의 모의실험 결과로서 전류-전압 및 전력-전압 특성곡선을 나타낸다.

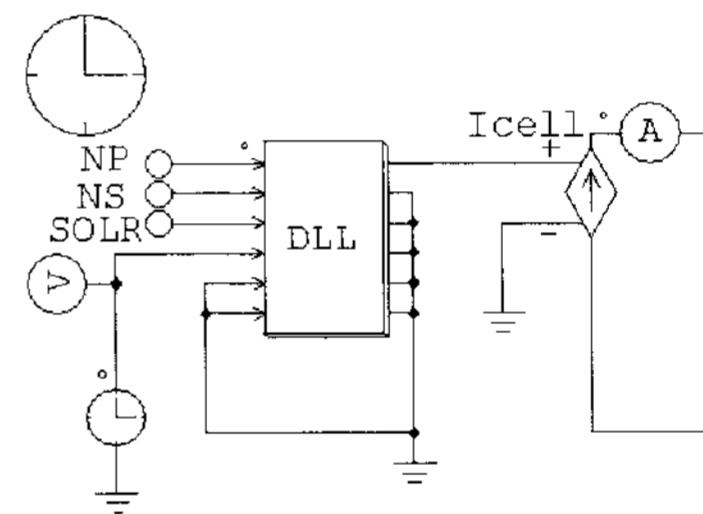


그림 2 태양전지 어레이의 PSIM 모델

Fig. 2 PSIM model of solar cell array

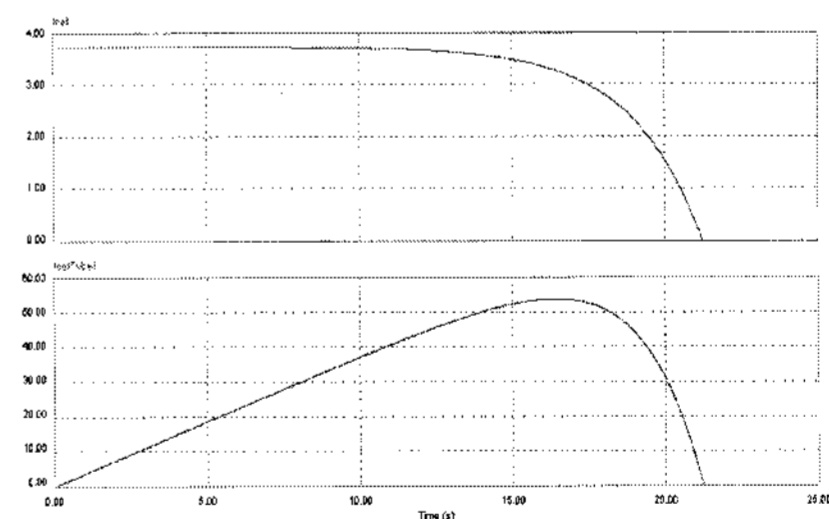


그림 3 태양전지 어레이의 I-V, P-V 특성곡선.

Fig. 3 I-V, P-V characteristic waveform of solar cell array.

2.2 PV 어레이의 경사각 모델링

PV 시스템 설계 시는 필연적으로 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일 평균 일사량의 비율인 \bar{R} 값이 산출되어야 한다.[15] 이 \bar{R} 값은 직달, 산란, 지면반사성분의 합으로부터 구할 수 있다. 만일 산란 일사량과 지면에서 반사되는 일사량이 각각 등방위성을 갖는다면, 월별 평균 일사량 비율 \bar{R} 값을 다음과 같이 표현할 수 있다.[16]

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \frac{\bar{H}_p}{\bar{H}} \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (7)$$

그리고 \bar{H}_T 는 식 (8)과 같이 된다.

$$\bar{H}_T = \bar{H} \cdot \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \bar{H}_p \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (8)$$

여기서, \bar{H}_d/\bar{H} 는 월별 1일 평균 일사율인 $K_T(\bar{H}/\bar{H}_o)$ 의 함수로서 수평면에서 월별 1일 평균 총 일사량에 대한 산란 일사량의 비율이고, \bar{R}_b 는 해당 달의 월평균 1일 값으로 수평면에서의 총 일사량에 대한 경사면 직달 일사량 비율인 \bar{H}_{bT}/\bar{H} 를 의미한다.

$$\bar{H}/\bar{H}_d = 0.775 + 0.00653 \cdot (\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos(115K_T - 103) \quad (9)$$

여기서, ω_s 는 수평면 일몰시간 각으로 $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \sigma)$ 이다. 해당지방의 월평균 대기권 밖의 일사량 \bar{H}_o 는 식 (10)에서 구할 수 있다.

$$\bar{H}_o = 24 \times 3600 \cdot G_{sc} / \pi [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \times [\cos \phi \cdot \cos \sigma \cdot \sin \omega_s + (2\pi \cdot \omega_s / 360) \cdot \sin \phi \cdot \sin \sigma] \quad (10)$$

북반구에서 적도를 향한 경사면, 즉 방위각이 정남 ($\gamma = 0^\circ$)을 향한 경우 \bar{R}_b 는 다음 식으로 정의된다.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (11)$$

여기서, 경사면 일몰 시간각인 ω_s 는 해당 월평균 일의 대표 값인 일 적위 등을 적용하여 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

북반구일 경우,

$$\omega_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}[-\tan(\phi - \delta) \tan \delta] \end{array} \right. \quad (12)$$

식 (11)에서 분자 항은 경사면에서 대기권 밖 일사량을, 분모 항은 수평면에서의 대기권 밖 일사량을 의미하며, 이들 각각의 값은 수평면, 또는 경사면에서 태양시를 기준으로 한 일출에서 일몰시간까지의 적분 치로서 구할 수 있다. 위의 식 (11)을 임의의 방향을 갖는 어떠한 평면에서도 적용할 수 있도록 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{R}_b = & (\cos \beta \sin \delta \sin \phi)(\omega_{SS} - \omega_{SR})(\pi/180) \\ & - (\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma)(\omega_{SS} - \omega_{SR})(\pi/180) \\ & + (\cos \phi \cos \delta \cos \beta)(\sin \omega_{SS} - \sin \omega_{SR}) \\ & + (\cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin \beta)(\sin \omega_{SS} - \sin \omega_{SR}) \\ & - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma)(\sin \omega_{SS} - \sin \omega_{SR}) \\ = & 2[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s + \sin \phi \sin \delta] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, ω_{SR} 과 ω_{SS} 는 각각 경사면에서의 일출, 일몰시간 각으로 다음 식에 의해 산출 할 수 있다.

$\gamma > 0^\circ$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \omega_{SR} = & -\min\{\omega_s, \arccos[(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1})/(A^2 + 1)]\} \\ \omega_{SS} = & \min\{\omega_s, \arccos[(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1})/(A^2 + 1)]\} \end{aligned} \quad (14)$$

$\gamma < 0^\circ$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \omega_{SR} = & -\min\{\omega_s, \arccos[(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1})/(A^2 + 1)]\} \\ \omega_{SS} = & \min\{\omega_s, \arccos[(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1})/(A^2 + 1)]\} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, A 와 B 는 다음 식에서 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} A = & \cos \phi / (\sin \gamma \tan \beta) + (\sin \phi / \tan \gamma) \\ B = & \tan \delta \{ (\cos \phi / \tan \gamma) - [\sin \phi / (\sin \gamma \tan \beta)] \} \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 PV 어레이의 방위각 모델링

방위각은 자남(magnetic south)이 아니고, 진남(true south)을 고려하여야 한다. 자북을 가리키는 나침반과 이 측정을 기초로 하는 방위각은 태양광발전소 부지의 자편각(magnetic declination)을 고려하여 진남 방위각으로 PV 어레이를 설치하여야 한다. 자편각은 미국 NGA(National Geospatial-Intelligence Agency)의 성과물인 WMM(World Magnetic Model)을 이용하여 본 논문의 태양광 추적장치의 방위각을 보정하였다.[17]

그림 4는 자편각을 나타내며, 본 논문에서 설치된 추적시스템의 자편각은 2007년 10월 15일 기준으로 7도 9분(서편각)이다.

Main Field		Secular Change	
D:	-7 Deg 9 Min (west)	dD:	-3.1 Min/yr (west)
I:	50 Deg 25 Min (down)	dI:	-1.4 Min/yr (up)
F:	49163.6 nT	dF:	30.0 nT/yr
H:	31320.9 nT	dH:	-3.7 nT/yr
X:	31076.3 nT	dX:	-7.2 nT/yr
Y:	-3906.8 nT	dY:	-27.7 nT/yr
Z:	32895.4 nT	dZ:	-35.8 nT/yr

그림 4 자편각.

Fig. 4 Grid variation.

3. 그림자 영향을 고려한 추적 제어 알고리즘

모듈을 구성하는 셀에 그림자의 영향이 있으면 셀이 발전하지 않고 Revers bias로 동작하게 되고 결과적으로 hot-spot의 문제로 나타나게 된다.

이는 태양광 발전시스템에서 셀의 손상을 가져오며 전체적인 시스템 출력저하의 원인이 된다. 이를 방지하기 위해 Bypass diode와 Blocking diode를 사용하고 있다.

태양전지 모듈의 성능감소 인자 중 hot-spot 현상은 모듈의 그림자에 대한 영향으로 Bypass diode가 없는 모듈에서는 그림자에 영향을 받은 셀이 Revers bias로 동작하여 발전을 하는 소자가 아닌 저항성 소자로 동작하여 전체적인 시스템 출력에 영향을 미친다. 또한 Bypass diode가 있는 경우라도 셀에 그림자가 60%이상이면 Bypass diode가 동작하여 그림자 영향이 없는 셀만 발전하게 되어 발전 전력량은 감소된다. 따라서 PV 어레이는 음영에 의해 발전량의 차이가 크게 변동하므로 하루 중 최대 에너지 획득을 위한 어레이 간 이격거리의 계산이 필요하며 넓은 면적이 요구된다. 하지만, 태양광 발전소의 설치용량 대비 부지면적 협소로 인하여 태양의 고도가 낮은 일출 후와 일몰 전의 시간에 야기되는 PV 어레이의 그림자 영향을 받아 셀의 Revers bias 동작이나 Bypass diode 동작으로 발전시스템의 발전량이 감소된다.

그림 5는 그림자 영향을 고려한 새로운 제어 알고리즘을 나타내며, 태양의 방위각에 따른 PV 어레이 사이의 길이 계산을 위한 좌표는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

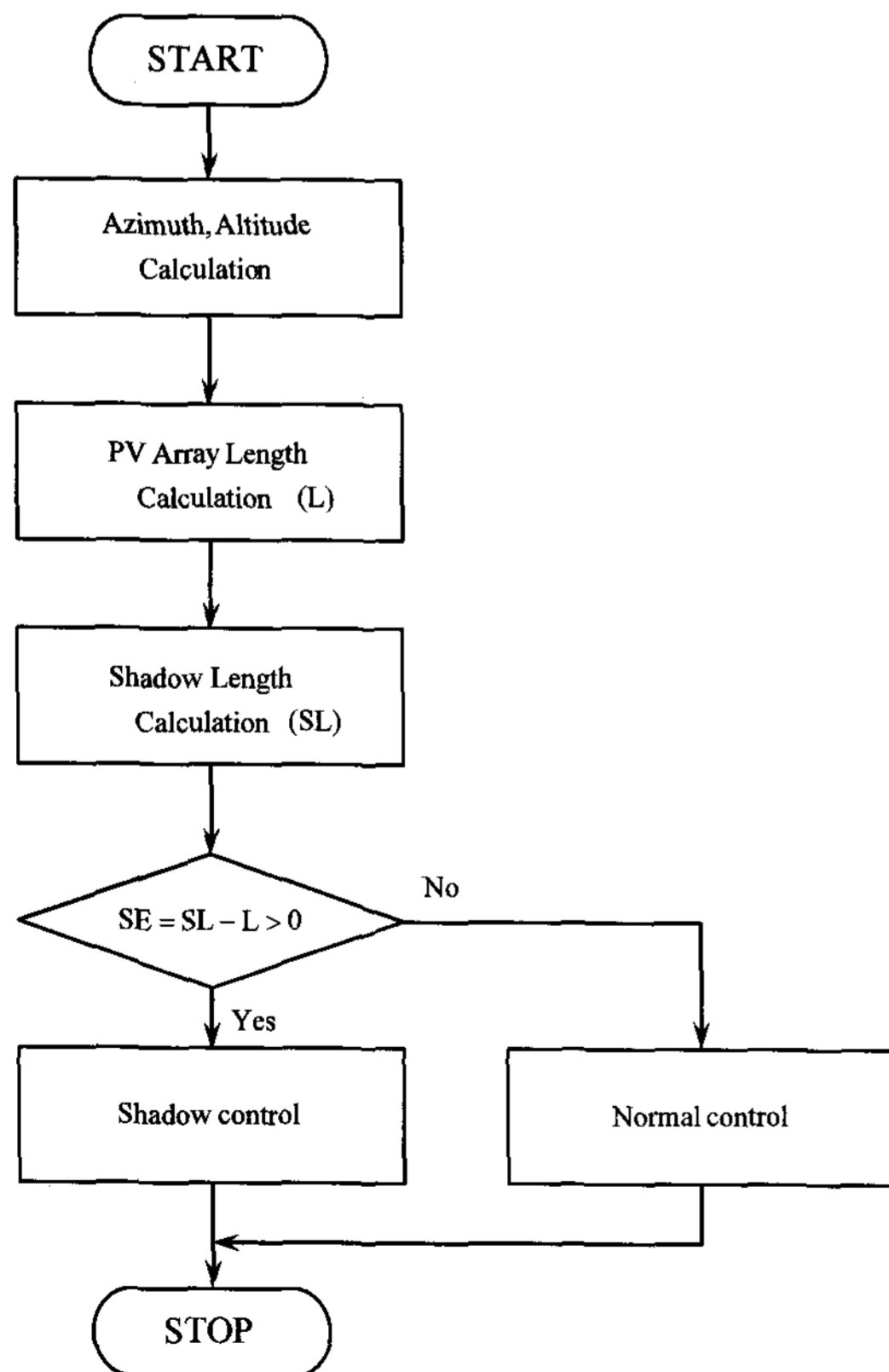


그림 5 추적제어기의 알고리즘.
Fig. 5 Algorithm of tracking controller.

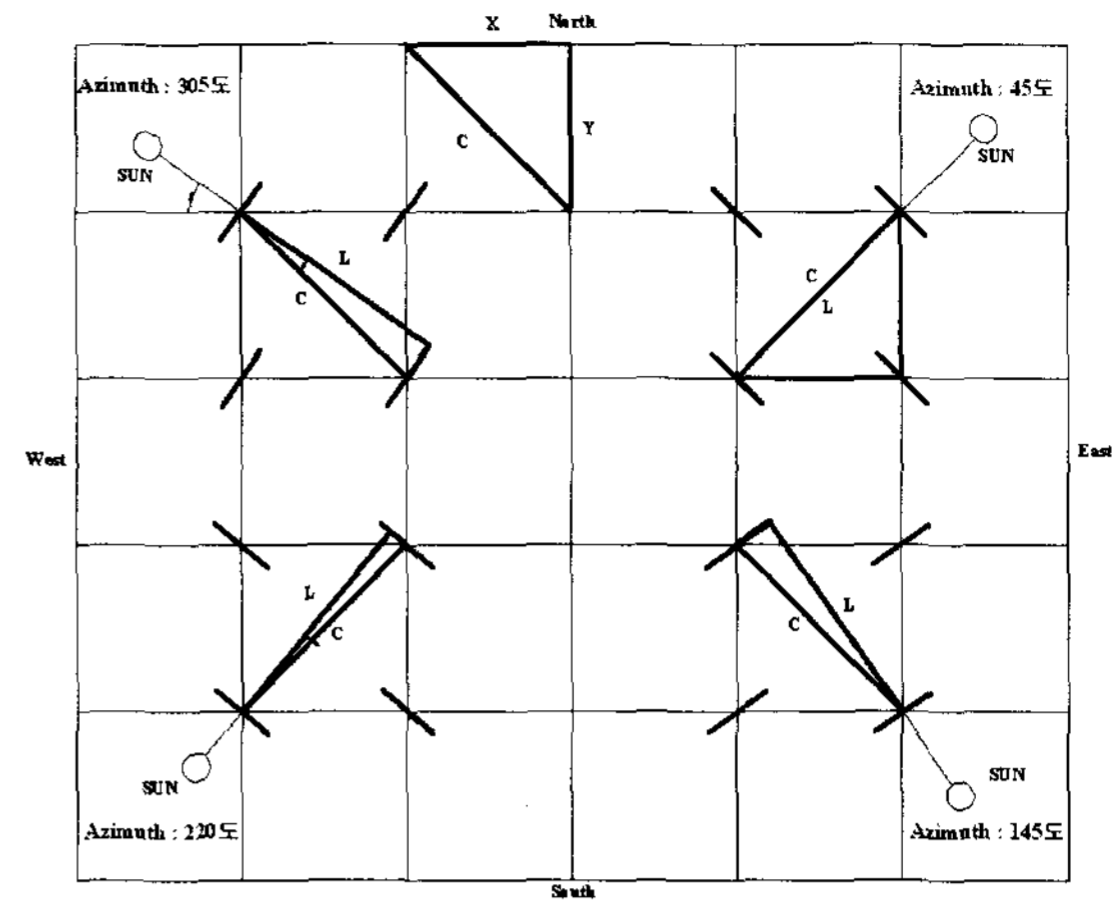


그림 6 태양의 방위각에 따른 PV 어레이 사이 길이 계산.
Fig. 6 Computation between PV array length by azimuth of solar.

현재 태양의 방위각을 계산하여 PV 어레이 사이의 길이를 구할 수 있다. 태양의 방위각에 따른 PV 어레이 사이의 길이는 식 (17)~(32)과 같이 계산 할 수 있다.

Case 1)

$$\text{Azimuth}(0^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(45^\circ)$$

$$\theta = 45^\circ - \text{Azimuth}(\theta) \tag{17}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{18}$$

Case 2)

$$\text{Azimuth}(45^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(90^\circ)$$

$$\theta = \text{Azimuth}(\theta) - 45^\circ \tag{19}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{20}$$

Case 3)

$$\text{Azimuth}(90^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(135^\circ)$$

$$\theta = 135^\circ - \text{Azimuth}(\theta) \tag{21}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{22}$$

Case 4)

$$\text{Azimuth}(135^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(180^\circ)$$

$$\theta = \text{Azimuth}(\theta) - 135^\circ \tag{23}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{24}$$

Case 5)

$$\text{Azimuth}(180^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(225^\circ)$$

$$\theta = 225^\circ - \text{Azimuth}(\theta) \tag{25}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{26}$$

Case 6)

$$\text{Azimuth}(225^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(270^\circ)$$

$$\theta = \text{Azimuth}(\theta) - 225^\circ \tag{27}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{28}$$

Case 7)

$$\text{Azimuth}(270^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(315^\circ)$$

$$\theta = 315^\circ - \text{Azimuth}(\theta) \tag{29}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{30}$$

Case 8)

$$\text{Azimuth}(315^\circ) < \text{Azimuth}(\theta) \leq \text{Azimuth}(360^\circ)$$

$$\theta = \text{Azimuth}(\theta) - 315^\circ \tag{31}$$

$$L = C \times \cos(\theta) \tag{32}$$

여기서, X, Y, C 는 PV 어레이 사이 간격이므로 고정된 값이며, 그림 7은 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용하여 구성된 PV 어레이의 실제 배치된 사진을 나타내고 있다.



그림 7 PV 어레이 구성.
Fig. 7 PV array composition.

식 (17)~(32)을 통하여 PV 어레이의 구성을 한 후, 추적 시스템의 발전 효율을 감소시키는 그림자 영향의 제어 인자인 고도각을 고려해야 한다. 그림 8은 고도각에 따른 PV 어레이 그림자 길이 계산을 나타내고 있다.

그림자의 길이는 다음 식 (33)과 같이 구해진다.

$$SL = AL \div \cos(\theta) \tag{33}$$

그림자 보상을 위한 제어방법은 PV 어레이의 그림자 영향을 받은 길이에 대하여 역으로 고도각을 제어하는 방법으로 식 (17)~(32)의 어레이 간 길이 (L)와 식 (33)의 그림자 길이(SL)를 변수로 하여 SL과 L의 오차길이를 각도로 환산하여 실제 태양의 고도각에 오차각을 보상하여 현재 고도각을 제어 할 수 있다.

$$SE = SL - L \tag{34}$$

그림자 길이(SL)와 어레이 간 길이(L)을 변수로 하여 보상각도(Mθ)는 식 (35)과 같이 구할 수 있다.

$$M\theta = \cos^{-1}\left(\frac{L}{SL}\right) \tag{35}$$

그림자 영향에 따른 현재 고도각은 식 (36)과 같다.

$$M\alpha_s \text{ (Modify Altitude)} = \alpha_s \text{ (Altitude)} + M\theta \tag{36}$$

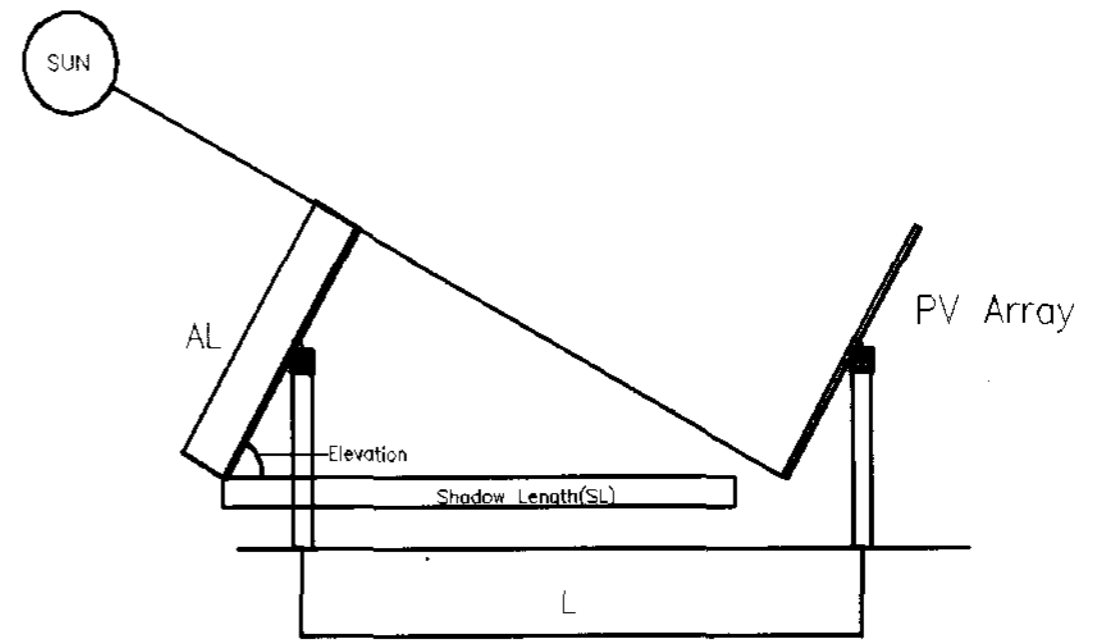


그림 8 고도각에 따른 PV 어레이 그림자 길이 계산.
Fig. 8 Shadow length computation of PV array by altitude.

추적장치 제어기에서는 현재의 태양 방위각과 어레이간의 간격을 이용하여 실제 어레이 간 이격거리를 계산하고 현재 시간의 그림자 길이와 어레이간의 이격거리를 비교한다. 그림자 길이가 이격거리 보다 클 경우 추적장치 제어기에서는 현재 태양의 고도각에 이격거리 오차 고도각을 보상하여 위치를 제어한다.

그림 9는 PV 어레이 사이 길이를 계산하는 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

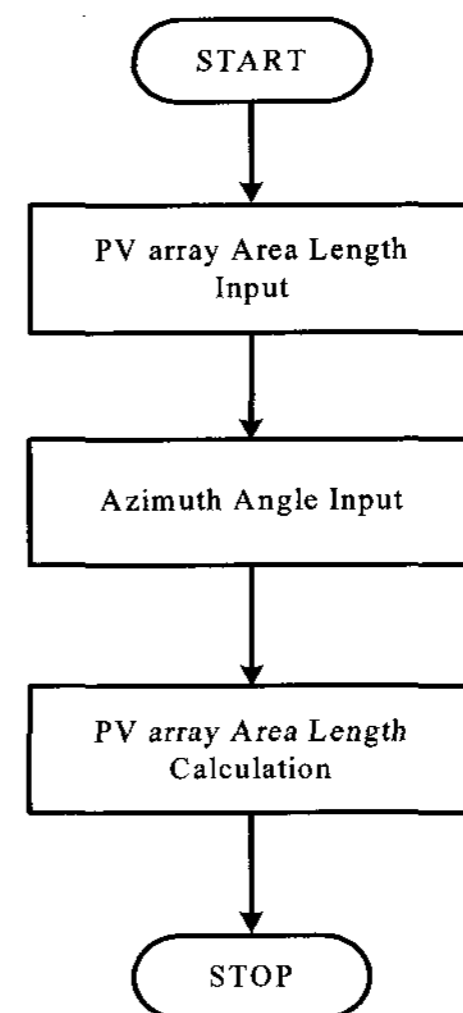


그림 9 PV 어레이 사이 길이 계산 알고리즘.
Fig. 9 Calculation algorithm between PV array length.

그림 10은 위의 그림 9에서 구해진 PV 어레이 사이 길이와 방위각을 이용하여 PV 어레이 그림자 길이를 계산하는 알고리즘을 나타내고 있으며, 그림 11은 본 논문에서 제시한 PV 어레이 그림자 보상 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

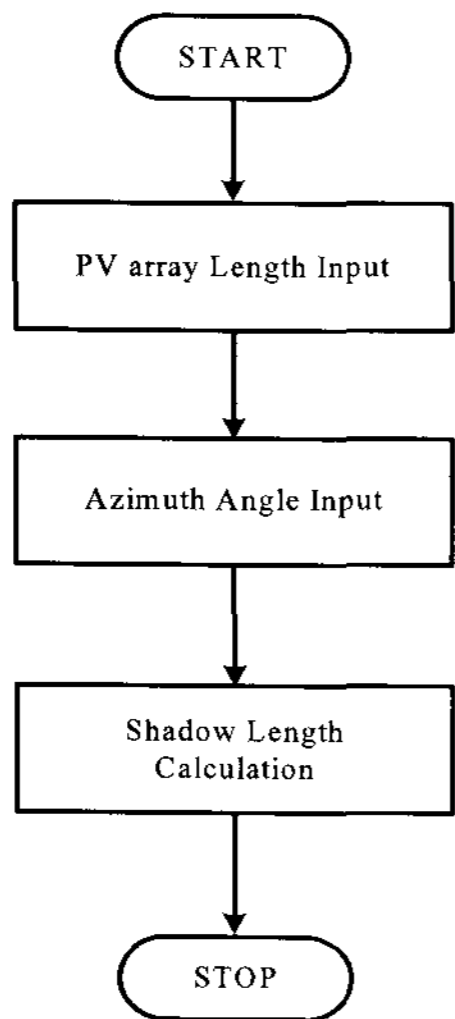


그림 10 PV 어레이 그림자 길이 계산 알고리즘.
Fig. 10 Shadow length calculation algorithm of PV array.

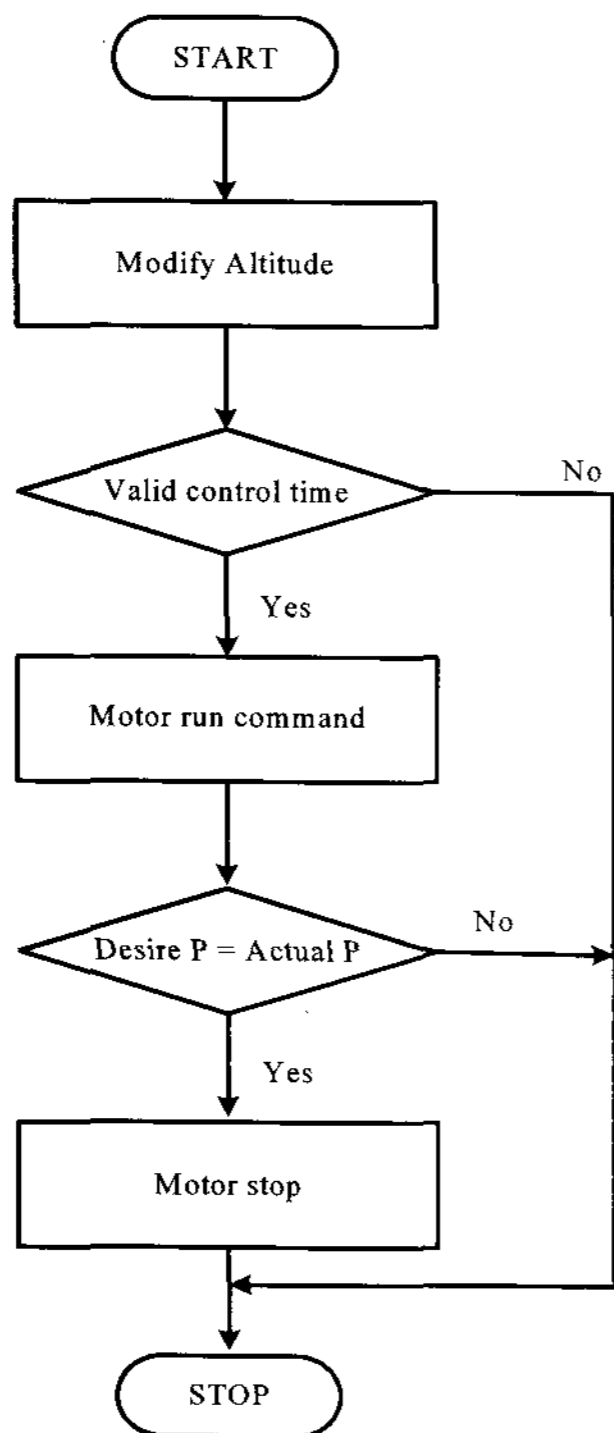


그림 11 PV 어레이 그림자 보상 알고리즘.
Fig. 11 Shadow compensation algorithm of PV array.

표 1 태양의 방위각 및 고도각에 따른 그림자 보상각.
Table 1 Shadow compensation angle by azimuth and altitude of solar.

시간 (시)	방위각 (도)	고도 (도)	Array 간격 (mm)	어레이 경사각 (도)	그림자 길이 (mm)	SE (mm)	그림자 보상각 (도)	제어 고도각 (도)
7	103.22	4.23	8041	85.77	64127	56085	82.8	87.03
8	112.50	15.94	8740	74.06	17220	8480	59.5	75.44
9	123.47	24.75	9269	63.25	10509	1240	28.1	54.86
10	137.00	34.15	9454	53.85	8018	-1436	0.0	34.15
11	154.01	43.13	8944	44.87	6918	-2026	0.0	43.13
12	174.45	44.48	7304	43.52	6523	-782	0.0	44.48
13	195.85	45.37	8262	44.63	6647	-1615	0.0	45.37
14	214.74	40.07	9309	49.93	7348	-1960	0.0	40.07
15	230.05	31.75	9423	58.25	8989	-435	0.0	31.75
16	242.08	21.55	9043	68.45	12877	3835	45.4	64.94
17	252.07	10.24	8424	79.76	26603	18179	71.5	81.78
X axis 길이	(mm)	6689.23	C axis 길이	(mm)	9460			
Y axis 길이	(mm)	6689.23	어레이길이	(mm)	4730			

4. 실험 및 결과

본 논문에서 사용된 태양전지 어레이는 210Wp 단결정 실리콘 태양전지 모듈로 태양전지 모듈 9장을 직렬로 연결하고 17 병렬 시스템으로 설계하였다. 태양전지 모듈의 사양은 다음 표 2와 같다.

표 2 태양전지 모듈 사양.
Table 2 Specification of solar cell module.

Maximum power(P_{max})	[W]	210
Max .power voltage(V_{mp})	[V]	41.3
Max. power current(I_{mp})	[A]	5.09
Open circuit voltage (V_{oc})	[V]	50.9
Short circuit current(I_{sc})	[A]	5.57
Warranted minimum power (P_{min})	[W]	199.5
Output tolerance	[%]	+10/-5
Maximum system voltage	[V]	600
Temperature coefficient of P_{max}	[%/°C]	-0.3
Temperature coefficient of V_{oc}	[V/°C]	-0.127
Temperature coefficient of I_{sc}	[mA/°C]	1.67
Standard Test Conditions : Air mass 1.5 Irradiance= $1000 W / m^2$, Cell temperature= $25^{\circ}C$		

표 1은 태양의 방위각 및 고도각에 따른 그림자 보상각의 계산한 결과 값이다.

또한, PCS(Power Conditioning System)의 용량선정을 위하여 태양전지 모듈의 온도계수를 고려한 전압 산출이 중요하다. 모듈

의 직렬 수는 인버터의 동작전압에 따라 결정되며, 설치장소의 최저온도에서는 개방전압의 값보다는 적고, 최고온도에서는 최소 MPPT 전압 값 보다는 커야한다. 본 논문에서의 직렬 수는 9로 선정하였으며, 표 3은 태양광 인버터의 사양을 나타낸다.

표 3 태양광 인버터 사양.

Table 3 Specification of PV inverter.

항 목	규 격
Recommended power supply	28-42 kWp
MPP voltage range	210-420 V
Max. input voltage (at 1000 W/m ² / -10°C in an open circuit)	530 V
Max. input current	164 A
Nominal output power(P _{max})	32 kW
Max. output power	32 kW
Nominal mains voltage	3NPE×400V, +10/-15 %
Nominal output current	3×46.4 A
Nominal frequency	60 ± 0.2 Hz
Distortion factor	-
Power factor	1
Maximum efficiency	94.3%
Overnight internal consumption	9W
Internal consumption operation	66W
Cooling system	Controlled forced-air ventilation

그림 12는 계통연계형 태양광 추적 시스템으로서 본 논문에서 제시한 실험장치 구성도를 나타낸다. 태양광 발전을 위한 태양전지 어레이와 위치추적을 위한 센서를 포함한다, 추적 제어 보드는 센서의 신호와 PC를 이용하여 개발된 알고리즘으로 제어된다. 인버터는 그림자 보상을 하였을 경우와 미 보상 하였을 경우를 비교하기 위해 두 그룹으로 구성하였으며, 최종 출력전력은 PC를 통해 모니터링을 할 수 있다. 또한 생산된 전력은 전력량계를 거쳐 한전계통과 연계되어 있다.

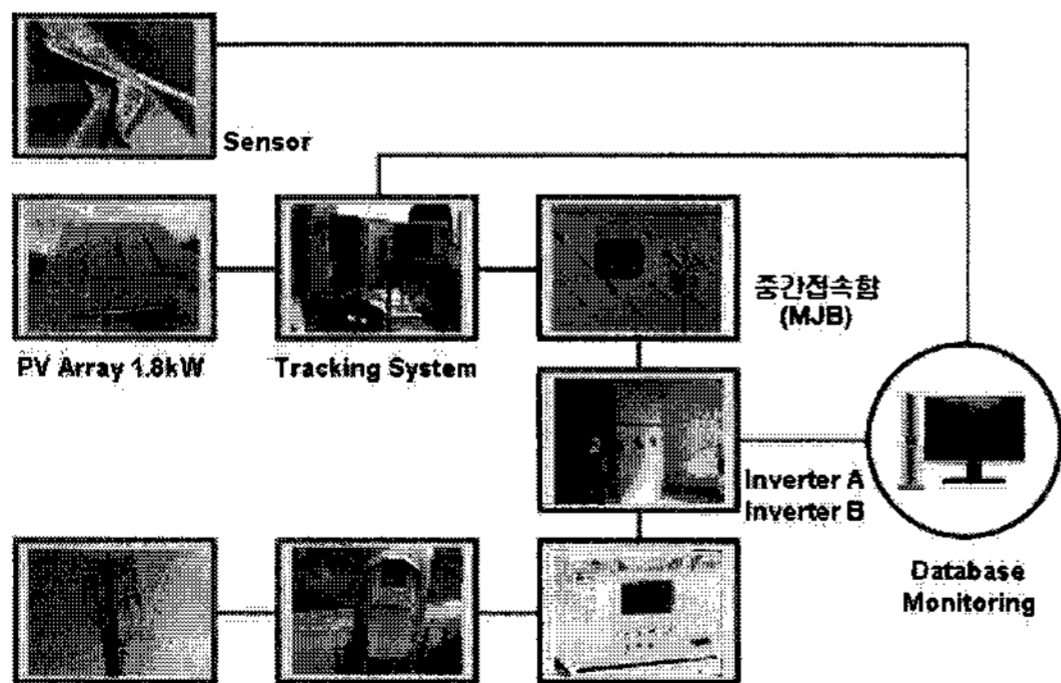


그림 12 본 논문에서 제시한 실험장치 구성도.

Fig. 12 Configuration of experiment device in proposed paper.

그림 13은 일사량 변화에 따른 대기온도 및 표면온도의 변화를 나타내고 있다. 일사량이 급변 시 모듈의 표면온도 역시 급변함을 알 수 있다.

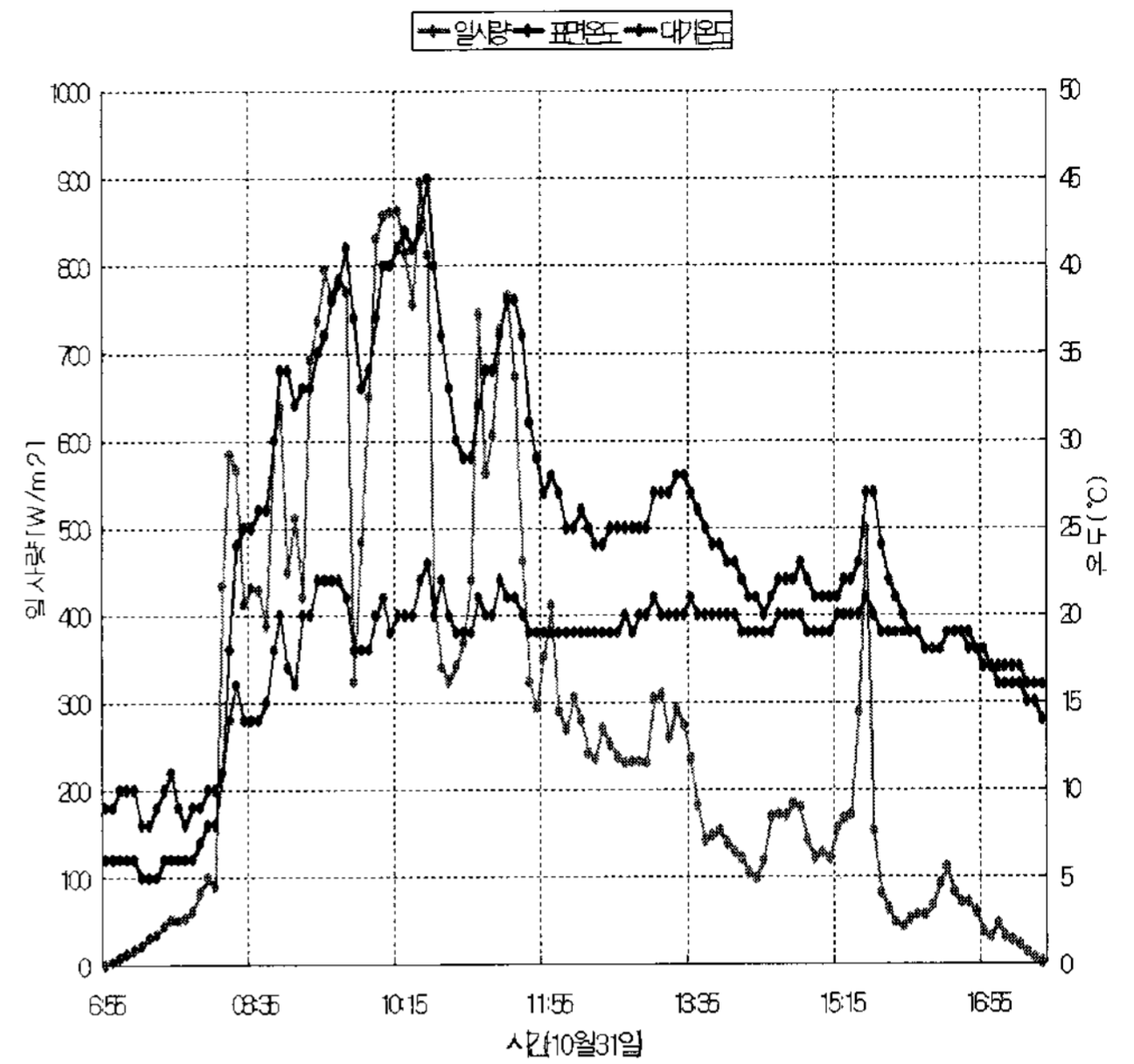


그림 13 일사량 변화에 따른 온도 변화.

Fig. 13 Temperature change by radiation variation.

그림 14는 그림자 보상에 따른 교류전력 변화를 나타낸 것으로서 9시 40분까지 제안한 그림자 보상 알고리즘에 의한 발전량 차이를 비교하면 그림자 보상기능을 탑재한 추적장치의 발전량은 21.94[kWh]이고 그림자 보상기능을 제외한 추적장치의 발전량은 16.45[kWh]로서 발전량 차이는 5.49[kWh]이다. 또한, 오후 시간의 그림자 보상 알고리즘에 의한 발전량 차이는 저 일사량으로 인하여 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

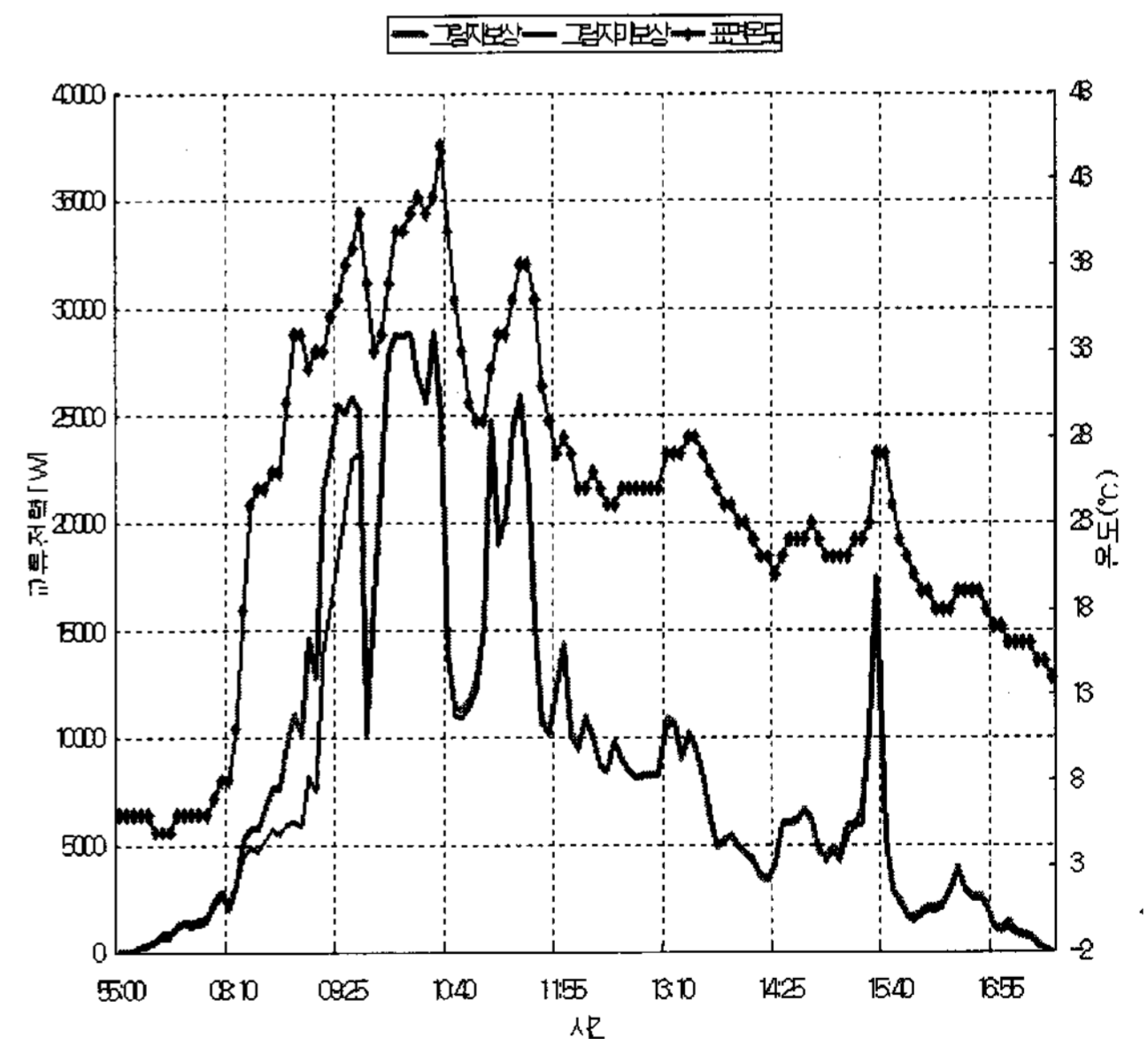


그림 14 그림자 보상에 따른 교류전력 변화.

Fig. 14 Change of AC power by shadow compensation.

그림 15는 본 논문에서 제안한 방법에 의한 그림자 보상을 알고리즘을 적용하여 분석한 자료로서 시간별 발전량 및 일사

량의 변화를 나타내고 있다. 본 논문에서 제시한 그림자 보상 알고리즘에 의한 발전량은 그림자 영향이 미 보상된 발전량에 비해 약 7[kW] 정도 높게 나타나고 있다.

그림 16은 본 논문에서 제안한 방법에 의한 그림자 보상의 알고리즘을 적용하여 1개월 동안의 분석 자료를 나타낸다. 최대 발전량 차이는 10월 31일에 약 7[kW]이다. 그림자 보상기능을 탑재한 추적장치의 총 발전량은 4829[kWh]이고 종래의 방법인 그림자 보상기능을 제외한 추적장치의 발전량은 4768[kWh]로 나타났으며, 두 비교군의 발전량 차이는 그림자 보상 알고리즘을 적용한 시스템이 61[kW]정도 높게 나타나고 있다. 따라서 실증실험에 의한 종래의 알고리즘 비교를 통해 본 논문에서 제시한 그림자 보상 알고리즘의 타당성 및 효율성을 입증할 수 있었다.

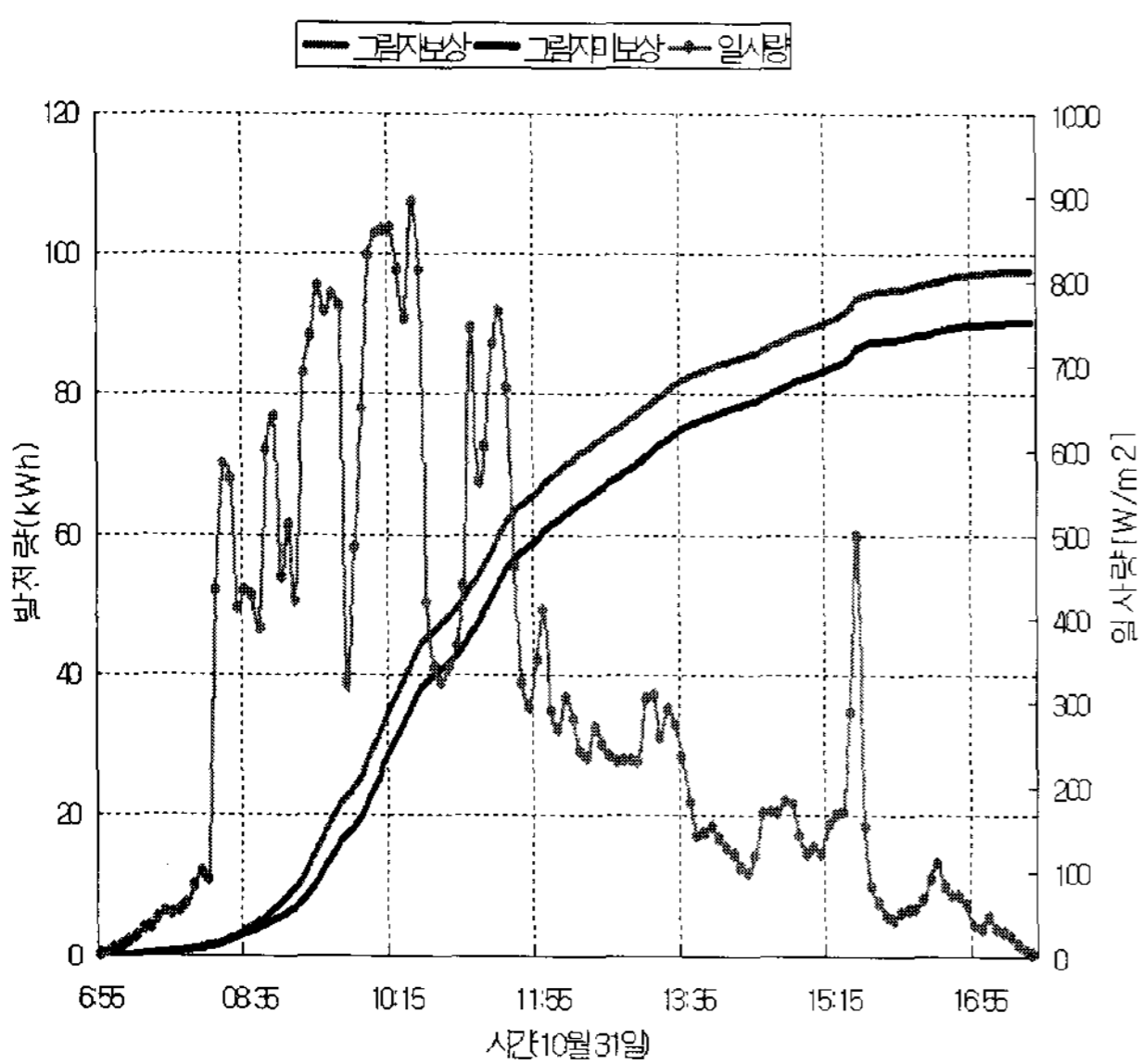


그림 15 그림자 보상에 따른 발전량 비교.
Fig. 15 Comparison with power by shadow compensation.

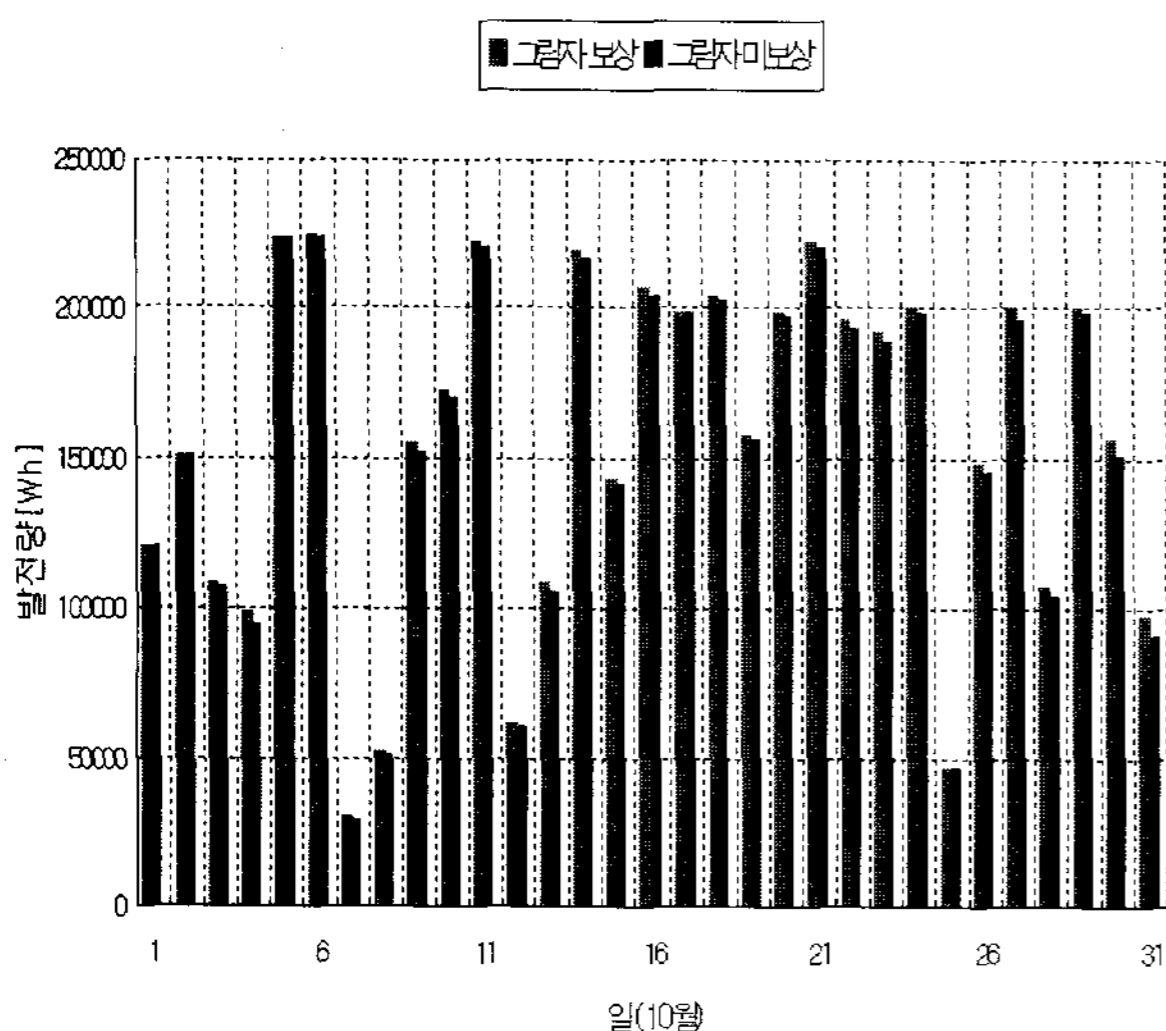


그림 16 그림자 보상에 따른 발전량 비교. (1개월)
Fig. 16 Comparison with power by shadow compensation. (a month)

6. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전시스템은 효율을 높이기 위한 방법으로 그림자 영향을 고려한 추적 시스템을 제시하였다. 국내의 태양광 발전소는 부지 협소로 인한 어레이간 간격을 충분히 이격하지 못하여 그림자가 발생할 수 있다. 이러한 그림자 영향은 PV어레이의 발전량을 감소시킴으로서 태양광 발전시스템의 효율을 떨어뜨린다.

본 논문에서는 방위각 계산을 통해 PV 어레이간의 간격을 설정하고 태양 추적 장치의 고도각을 제어하는 역 추적 방법을 제안하였다. 이러한 그림자 보상 알고리즘을 적용한 추적 시스템은 종래의 추적시스템과 교류전력 변화 및 발전량에 대해 비교하였다.

제시한 그림자 보상 알고리즘을 적용한 시스템은 종래의 추적 시스템에 비해 그림자 영향이 미치는 오전 시간대에 교류 출력전력이 더 높게 나타났다. 또한 제시한 알고리즘은 1일 발전량은 약 7[kW]정도, 1개월 동안의 발전량은 약 61[kW] 정도 더 높게 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 그림자 보상 알고리즘의 타당성을 입증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] 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 (2002)*, pp. 1113-1118.
- [2] 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(2002)*, pp. 200-205.
- [3] W. A. Lynch, M. Salameh, "Simple eletro-optically controlled dual axis sun tracker", *Solar Energy, Vol. 45(1990)*, pp. 65-69.
- [4] E. A. barber, H. A. Ingley, C. A. Morrison, " A solar powered tracking device for driving concentrating collectors", *Alternative Energy Source, Vol. 1(1997)*, pp. 527-539.
- [5] B. P. Edwards, "Computer based sun following system", *Solar Energy, Vol. 21(1998)*, PP. 491-496.
- [6] Cooper P. I., 1969, "The absorbtion of radiation in solar stills", *Solar Energy 12*, 333 -346.
- [7] L. O. Lamm, 1981, "A new analytic expression for the equation of time", *Solar Energy 26*, 465.
- [8] J. W. Spencer, 1989, Comments on "The astronomical almanac's algorithm for approximate

solar position (1950 - 2050)", *Solar Energy Vol. 42, No. 4, 353.*

- [9] J. J. Michalsky, 1988, "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950 - 2050)", *Solar Energy, Vol. 40, No. 3, 227 - 235.*
- [10] L. L. Vant-Hull, A. F. Hildebrandt, 1976, " Solar thermal power system based on optical transmission", *Solar Energy 18, 31 - 39.*
- [11] R. Walraven, 1978, "Calculating the position of the Sun", *Solar Energy 20, 393 - -397.*
- [12] M.C. Alonso-Gaica, "Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of photovoltaic module", *Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 90, Issue 3, P.329, 2004.*
- [13] 김형석, 박정민, 외 3인, "마이크로 컨트롤러를 이용한 태양 광발전용 승압초퍼용 MPPT 제어기에 관한 연구"
- [14] Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter Topologies using a Matlab PV model", *IEAust, vol. 21, pp. 49-56, 2001.*
- [15] D. Feuermann, and A. Zemel, Validation of Models For Global Irradiance, on Inclined Planes, *Solar Energy, Vol. 48, No. 1, 1992.*
- [16] T.M.Klucher, Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surface, *Solar Energy, Vol.23, 1992.*
- [17] McLean, S., S. Macmillan, S. Maus, V. Lesur, A. Thomson, and D. Dater, "The US/UK World Magnetic Model for 2005-2010", *NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1, December 2004.*

저 자 소 개



박기태 (朴基泰)

1794년 2월 9일생. 1999년 순천대 공대 전기제어공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008. 2월 동 대학원 졸업(박사)

Tel : 061-793-5925

Fax : 061-794-5925

E-mail : bosom@korea.com



최정식 (崔正植)

2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업 2007년 2월 순천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 3월 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 061-750-3543

Fax : 061-752-9841

E-mail : 1108cjs@daum.net



정동화 (鄭東和)

1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수. 2006년

10월 순천대학교 정보전산원장

Tel : 061-750-3543

Fax : 061-752-9841

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

WebPage : <http://pelab.sunchon.ac.kr/~hwa777>