

해상용 태양광 발전 시스템의 설치 각도에 관한 연구

† 오진석 · 장재희*

† 한국해양대학교 기관공학과 교수, *한국해양대학교 대학원

A Study on the Installation Angle of the Marine Solar Power Generation System

† Jin-Seok Oh · Jae-Hee Jang*

* † Dept. of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

요 약 : 해상에서 운용되는 일점계류형 해양플랜트의 태양광 발전 시스템은 독립 전원 체계를 가지고 있으며, 해상 환경, 부조일수 등의 영향으로 안정적인 전력을 공급하는 것이 중요하다. 이러한 이유로 태양광 패널을 여러 방향으로 설치하게 되는데, 이 때 각 패널마다 입사되는 광량이 달라지므로 부분음영현상이 발생하게 된다. 육상용 태양광 발전시스템의 발전량은 위도의 영향을 받으므로 우리나라의 경우 30~36° 사이의 각도로 설치하는 것이 일반적이나, 일점계류형 해양플랜트에 설치되는 태양광 발전 시스템의 경우 부분 음영 현상에 의해 최대전력점이 제어 가능 범위 밖에 존재하는 경우가 발생하게 되고 이는 전력 발전 손실이 된다. 이 때 두 패널의 광량차이를 줄임으로써, 최대 전력점을 MPPT 알고리즘이 추종 가능한 범위에 존재하게 하여 발전 효율을 더 높일 수 있으며, 시뮬레이션 결과 설치각도 20°에서 가장 높은 발전 효율 가짐을 확인하였다.

핵심용어 : 일점계류형 해양플랜트, 태양광 발전 시스템, 최대전력점 추종 알고리즘, 부분음영현상

Abstract : A solar power generation system on single point moored offshore plant has independent power system In order to satisfy the maritime environment and account for the number of sunless days, it is important to supply stable electric power to the systems. For these reasons, solar panels are installed in multiple directions. However, a partial shading effect occurs because the amount of light incident on each panel is different. The generated power by the solar generation system installed on land is affected by the latitude, then it is installed at an angle of 30 to 45°, in the case of Korea. In the case of a solar power generation system installed in a mooring type of marine plant, there is a possibility that the maximum power point is outside of the controllable range due to the partial shading effect. Therefore, a power generation loss occurs. By reducing the light amount difference between both panels, the maximum power point can exist in a range where the MPPT algorithm can track the power. The purpose is so the power generation efficiency can be further increased. In this paper, simulation results show that the highest power generation efficiency is obtained at an installation angle of 20°.

Key words : SPM(Single Point Mooring) System, Solar Power Generation System, MPPT(Maximum Power Point Tracking) Algorithm, Partial Shading Effect

1. 서 론

SPM(Single Point Mooring) 시스템은 선박의 계류 역할 및 육상 시설과 유조선을 연결하여 원유, 가스 등을 이송시키는 역할을 하는 일점계류형 해양플랜트이다. SPM 시스템은 육상과 떨어진 해상에 설치되는 독립형 전력체계로 HPU(Hydraulic Power Uint) 시스템, 포그혼, 통신장치 등을 사용하기 위한 전력 공급원으로 배터리를 이용한다[1]. 배터리만으로 전원을 공급하는 시스템은 외부로부터 충전이 필요하기 때문에 유지 및 관리가 어렵다는 단점이 있다. 또한 최근 SPM 시스템은 선박의 대형화, AIS(Auto Identification System) 등의 추가 기능을 요구하면서 전력의 수요가 증가하고 있어 보다 안정적으로 전력을 공급하기 위해 태양광 발전

시스템 등을 추가하고 있다. 다음 Fig. 1은 SPM 시스템에 설치된 태양광 발전 시스템을 나타내고 있다.

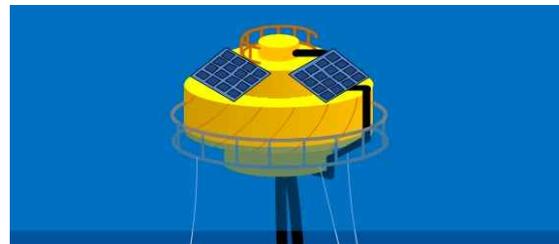


Fig. 1 Solar generation system on SPM

브리와 같은 해상구조물이나 Fig. 1과 같은 SPM에 사용되

† Corresponding author : 종신회원, ojs@kmou.ac.kr 051)410-4283

* 정회원, jjh799@naver.com 051)410-4866

는 태양광 발전 시스템은 축전시스템과 함께 독립 전원 시스템으로 운용될 수 있다. 또한 태양광 어레이와 부하 시스템 또는 배터리 사이에 강압형 컨버터를 이용하여 전력 변환을 하면 더 안정적인 시스템을 구성할 수 있다. 또한 발전 전압에 따라 생산 전력이 달라지는 태양광 패널의 특성 상 컨버터의 스위칭 듀티비를 변화시킴으로서 태양광 발전 시스템의 최대 발전 전력 제어가 가능하게 된다.[2]

육상 태양광 발전 시스템의 경우 최적 태양광 패널 설치 각도는 설치 지역의 위도와 경도에 영향을 받는다. 우리나라의 경우 패널을 남향으로 지면으로 부터 30~36°의 각도를 갖도록 설치할 때 가장 높은 발전량을 나타낸다.[3]

하지만 SPM과 같은 일점계류형 해양플랜트에 설치되는 태양광 발전 시스템의 경우, 육상용 태양광 발전 시스템과는 달리 구조 자체의 회전, 파랑의 영향 등이 발전에 영향을 미치기 때문에 이를 고려한 설계가 필요하다.

2. 태양광 발전 시스템

2.1 독립형 태양광 발전 시스템

태양광 발전 시스템을 구성하는 태양전지는 광전 효과를 이용하여 태양에너지를 전기 에너지로 변환시킨다. 이러한 태양전지를 직렬로 여러 개 연결하여 모듈이라고 하며 일반적으로 한 장의 태양광 패널 한 장을 가리킨다. 이 패널을 직렬 또는 병렬로 연결하여 태양광 어레이를 구성하는데, 어레이의 구성방식에 따라 태양광 발전 시스템의 전압 및 전류 특성이 변화하게 된다. 따라서 태양광 발전 시스템을 설계 할 때는 태양광에서 발전된 전력을 사용하는 시스템 특성에 맞게 태양광 패널을 직병렬 어레이로 구성하면 된다[4].

2.2 태양광 셀 등가회로 선정

태양광 발전은 일사량, 온도 등의 환경 조건의 영향을 받는다. 또한 비선형 전원으로 부하 측 전압에 따라 출력특성이 변화하게 된다. 태양광 출력특성을 반영한 태양광 어레이 모델을 설계하기 위해 태양광 셀의 등가회로를 선정하였다. 태양광 셀의 전기적 등가회로로는 Single Diode Model, Two Diode Model 등이 있으며,[5] 본 논문에서는 싱글 다이오드 모델을 태양광 셀 등가회로로 선정하여 모델링을 진행하였다. 다음 Fig 2는 태양광 셀의 전기적 등가회로인 단일 다이오드 모델을 나타내고 있다[6].

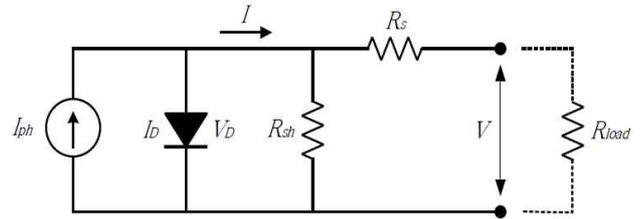


Fig. 2 Single diode model of solar cell

태양광 셀의 특성은 광전효과를 통해 발생하는 광전류원 I_{ph} 와 다이오드 D , 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 로 표현할 수 있다. 단일 다이오드 모델을 통해 태양광 셀의 출력을 출력 전류 I 와 출력전압 V 로 나타내면 다음 식(1)과 같다[7].

$$I = I_{ph} - I_D \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{nKT N_s} \right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

이때 q 는 전하량($1.602 \times 10^{-19}C$), n 은 다이오드의 이상계수, K 는 볼츠만 상수($1.38054 \times 10^{-23}J/K$), T 는 태양전지의 절대온도, N_s 는 태양광 패널을 이루는 태양광 셀(solar cell)의 개수를 의미한다.

2.3 태양광 발전 시스템의 특성

태양광 패널은 비선형성 전력원으로 전압에 따라 전류 및 출력이 달라진다. 태양광 패널의 전압-전류 및 전압-출력 관계는 특성곡선을 통해 살펴볼 수 있다. 다음 Fig 3은 태양광 패널의 특성곡선을 나타낸다.

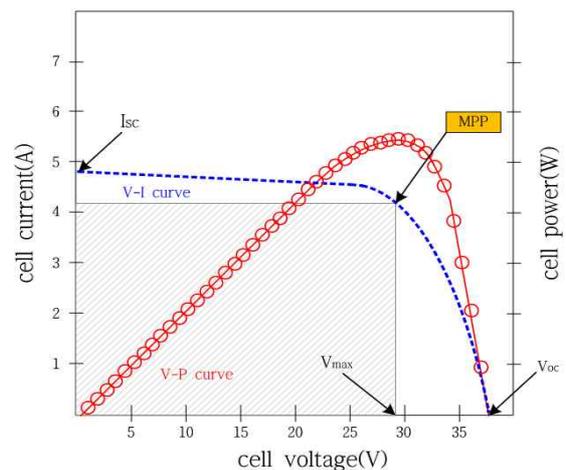


Fig. 3 Characteristic curve of solar panel

특성곡선을 통해 살펴볼 주요 인자는 단락전류, 개방전압, 최대전력점 등이 있다. 단락전류는 태양광 패널에 걸린 전압

이 0V일 때 흐르는 전류이다. 이는 태양광 패널이 발전할 수 있는 최대 전류를 의미한다. 개방전압은 태양광 패널에 흐르는 전류가 0A일 때 걸리는 전압을 가리키며 태양광 패널이 발전할 수 있는 최대 전압을 의미한다. 최대전력점은 태양광 패널의 출력이 최대가 되는 점을 의미한다. MPPT(Maximum Power Point Tracking, 최대전력추종) 알고리즘이 추종하고자하는 목표가 된다.

2.4 벡컨버터

2.3 절에서 설명된 것과 같이 태양광 패널은 전압에 따라 발전되는 전력이 변화하는 특성곡선을 가지게 되므로 Fig. 4의 벡 컨버터의 스위칭 듀티비(duty ratio)를 조정하여 발전하는 전압을 변경가능하다.

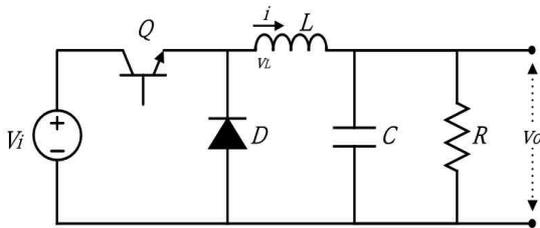


Fig. 4 Circuit of buck converter

배터리 전압을 기준으로 할 때, 강압형 컨버터인 벡 컨버터는 태양광 패널의 개방전압부터 배터리 전압까지 변경이 가능하고, 승압형 컨버터인 부스트 컨버터는 0V부터 배터리 전압까지 변경이 가능하다. 일반적으로 태양광 발전 시스템의 태양광 패널의 개방전압은 배터리 또는 부하단의 기준 전압보다 크게 설정되므로 벡 컨버터가 일반적으로 사용된다. Fig. 5는 배터리 전압과 벡컨버터의 전압 변경 가능 범위를 나타내고 있다.

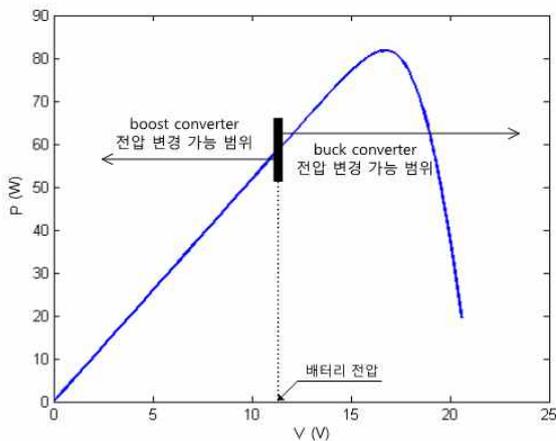


Fig. 5 Voltage control range of converter

2.5 최대전력추종 알고리즘

태양광 발전 시스템은 태양광 모듈의 온도, 입사되는 태양광량 등의 영향을 받기도 하나, 같은 광량 및 온도 상태에서라면 발전하는 전압의 상태에 따라 출력이 변화한다. 그러므로 최대전력을 생산하는 전압상태를 계속해서 추종가능하다면 태양광 발전 시스템은 최대 발전 조건에서 전력생산이 가능해진다. 이와 같이 전압상태를 체크하고 최대전력점을 추종하는 방법에는 P&O(Perturb & observe) 알고리즘, IncCond(Incremental conductance) 알고리즘 등이 있다. Fig 6은 P&O 알고리즘을 나타내고 있다.

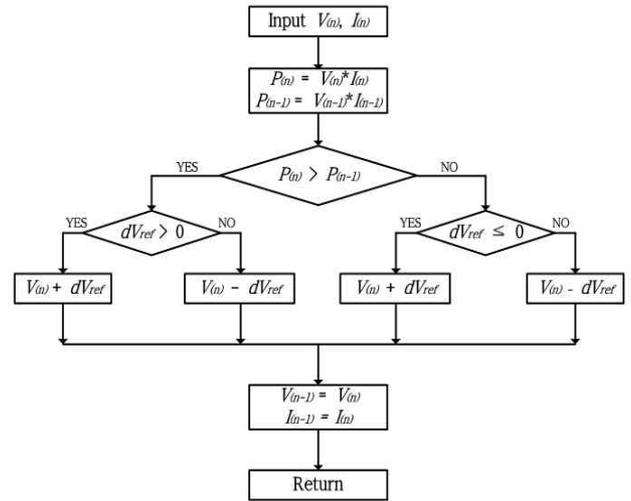


Fig. 6 P&O algorithm

P&O 알고리즘은 전압값을 변화시켜가며 이전 전압에서의 출력값과 변화된 전압에서의 출력값을 비교하여 최대전력점을 추종한다. 태양광 패널의 전압 $V(n)$ 와 전류 $I(n)$ 를 입력받아 현재 생산 전력 $P(n)$ 를 계산한다. 이 때 계산된 $P(n)$ 이 이전 루프에서 계산된 $P(n-1)$ 를 비교하여 $P(n) > P(n-1)$ 이고, V 의 변화량 dV_{ref} 가 양수 일 경우 전압에 변화량을 더하고, dV_{ref} 가 음수일 경우는 변화량을 빼고, $P(n) < P(n-1)$ 이고 dV_{ref} 가 양수일 때는 변화량을 빼고, dV_{ref} 가 음수일 경우는 변화량을 더해서 최대 전력점을 찾게 된다.[8]

P&O 알고리즘은 알고리즘이 단순하여 계산이 빠르다는 장점이 있다.

3. 일점 계류형 태양광 발전 시스템

일점 계류형 태양광 발전 시스템은 구조물의 회전에 상관없이 안정적인 출력을 얻기 위해 두 장의 태양광 패널을 등지게 설치한다. 태양광 패널은 태양광 발전 시스템을 통해 최대 전력점에서 발전할 수 있고, 발전된 전력은 배터리에 저장되거나 중앙제어 패널을 통해 포그혼(fog horn), 유압기기 등의

부하에서 사용될 수 있다. Fig. 7은 일점 계류형 태양광 발전 시스템의 구성을 나타낸다.

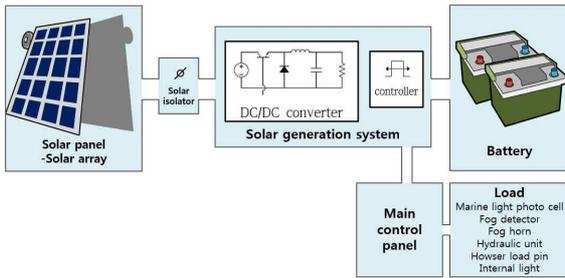


Fig. 7 Power system of SPM

3.1 부분 음영 현상

부분 음영 현상이란, 태양광 셀에 입사되는 광량이 다른 경우에 특성곡선이 변화하는 현상이다. 일점계류형 해양플랜트에 설치되는 태양광 발전 시스템이 안정적인 출력을 얻을 수 있도록 태양광 패널을 여러 방향으로 설치하게 되면 각 태양광 패널에 입사되는 광량이 다를 수 있으므로 부분 음영 현상에 취약해진다. 다음 Fig 8는 부분음영현상이 발생한 태양광 패널의 특성곡선이다.

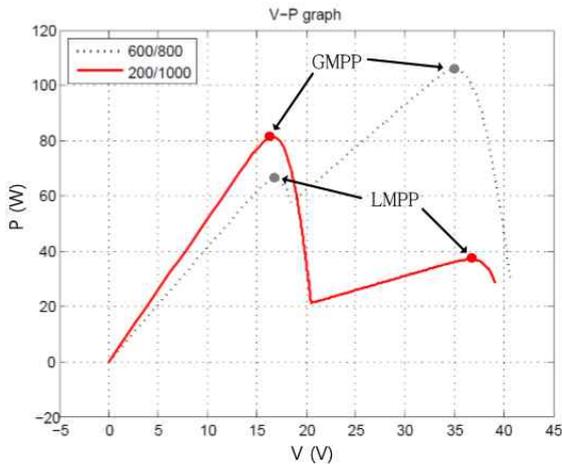


Fig. 8 V-P curve on Partial shading effect

부분 음영 현상이 발생한 태양광 발전 시스템의 특성곡선에는 MPPT 알고리즘에서 최대전력점으로 판단될 수 있는 MPP가 여러 개 발생하는 것이 특징이다. 이 때, 구역마다 생기는 MPP를 LMPP(Local Maximum Power Point)라고 하며 그 중 가장 높은 출력을 내는 MPP를 GMPP(Global Maximum Power Point)라고 한다. MPPT 알고리즘은 이전 출력값과 현재 출력값을 비교하여 출력이 더 높은 쪽으로 전압을 변경하기 때문에 전압이 LMPP가 있는 구간에서 존재하는 경우, GMPP를 추종하지 못하여 GMPP와 LMPP의 차이만큼의 발전 손실이 발생하게 된다.

3.2 부분 음영 현상과 광량의 관계

제안된 태양광 발전 시스템과 같이 전력의 안정적인 공급을 위해 여러 방향으로 태양광 패널을 설치할 경우에는 부분 음영 현상이 발생한다. 부분 음영 현상은 광량 차이에 의해 발생하며, V-P 그래프의 형태 또한 광량 차의 영향을 받는다.

두 패널에 입사되는 광량이 다를 경우, 개방전압 V_{OC} 과 단락전류 I_{SC} 가 달라지면서 MPP에서의 전압 V_{MPP} , 전류 I_{MPP} 및 발전 전력 P_{MPP} 에 차이가 발생한다. 다음 식 (2)~(4)는 직렬로 연결된 두 패널에서 생성되는 전류와 전압을 나타내고 있다[9].

$$I = \begin{cases} I_{ph1}(G_1) - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} & I_{ph} \geq I_{ph2} \\ I_{ph2}(G_2) - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} & I_{ph} < I_{ph2} \end{cases} \quad (2)$$

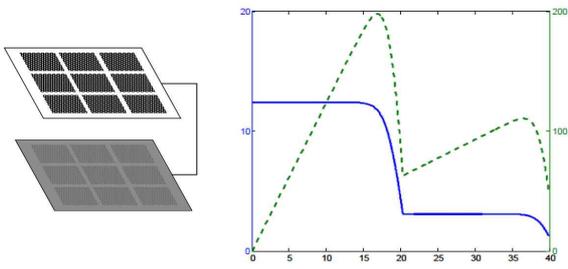
$$V = \begin{cases} V_1 & I_{ph} \geq I_{ph2} \\ V_1 + V_2 & I_{ph} < I_{ph2} \end{cases} \quad (3)$$

$$I = I_{ph} - I_D \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

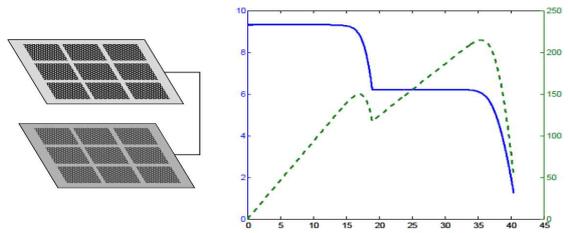
직렬로 연결된 두 패널에서 생성되는 전류는 2.2절에서 제시한 식과 유사하게 나타난다. 패널 1에 입사되는 광량 G_1 과 패널 2에 입사되는 광량 G_2 에 따라 달라지는 패널 1의 광생성전류 I_{ph1} , 패널 2의 광생성전류 I_{ph2} 의 크기에 따라 두 개의 특성곡선이 중첩되어 나타나게 된다.

부분음영현상이 발생한 특성곡선의 형태는 몇 가지로 나눌 수 있다. GMPP가 오른쪽에 위치하는 경우, GMPP가 왼쪽에 위치하는 경우, 두 개의 GMPP가 나타나는 경우가 있으며, 이러한 특성곡선의 형태는 광량에 의한 광생성전류의 영향을 받으므로, 광량의 차이에 따라 결정된다.

태양광 발전 시스템은 배터리 전압 아래로는 전압을 떨어뜨릴 수 없는 벡 컨버터의 특징으로 인해 V-P 그래프의 오른쪽 부분에서만 MPPT 알고리즘이 동작하게 된다. 육상용 태양광 발전시스템의 경우 구름에 태양광 패널이 가리거나 패널이 오염된 경우를 제외하고는 일반적으로 오른쪽에 GMPP가 생기게 되므로 배터리에 의한 추종 불가능한 전압 범위에 대해 고려할 필요가 없다. 하지만 안정된 전력 공급을 위해 태양광 패널을 여러 방향을 설치하게 되는 해양플랜트의 태양광 발전 시스템의 경우에는 GMPP가 추종 불가능한 전압 범위에 위치할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 다음의 Fig 9은 두 개의 직렬 연결된 태양광 패널에 입사되는 광량에 따른 특성곡선의 형상 차이를 나타내고 있다.



(a) 800W/m² on panel 1 and 200W/m² on panel 2



(b) 600W/m² on panel 1 and 400W/m² on panel 2

Fig. 9 Characteristic curve in case of difference irradiation between panels

두 패널에 입사되는 광량의 차이가 큰 경우에는 GMPP가 왼쪽에, 두 패널에 입사되는 광량의 차이가 작은 경우에는 GMPP가 오른쪽에 발생한다. 태양광 패널의 설치각도를 조정하여 두 패널의 광량차이를 줄인다면, GMPP를 오른쪽에 위치시켜 부분음영 현상에 의한 손실을 줄일 수 있다.

우리나라의 육상 태양광 발전 시스템의 경우 30~36° 사이의 각도로 설치할 때 가장 높은 발전 효율을 보인다. 본 논문에서는 우리나라의 위도와 부분음영현상을 고려하여 최적의 설치각도를 도출하고자 한다.

4. 시뮬레이션

부분음영현상을 고려한 태양광 패널의 설치각도를 도출하기 위해서 위치에 따른 태양광량 시뮬레이션, 태양광 패널 시뮬레이션, 광량차이와 GMPP와 관계 시뮬레이션, 두 패널의 설치각도에 따른 발전량 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 위치에 따른 태양 고도 시뮬레이션

지표면에서 태양광량은 흡수와 산란 등의 대기효과, 수증기, 구름, 오염 등의 국부적 변화, 지리상의 위도, 계절의 변화 등에 영향을 받는다[10].

4.1.1 시간각(Hour angle)

시간각은 시간을 태양이 하늘을 가로질러움직이는 각도수로 변환한 것이다. 지구가 시간당 15°씩 회전하므로 시간각 또한 시간당 15°씩 변화하게 되며, 정오 때 시간각을 0°로 정의

하여 오전에는 음의 시간각을, 오후에는 양의 시간각을 갖는다. 시간각은 다음의 식(5)로 표현할 수 있다.

$$HA = 15(T_{LS} - 12) \quad (5)$$

여기에서 T_{LS} 지방시간을 의미한다.

4.1.2 경사각(Declination angle)

지구에서 중심에서 태양의 중심까지 연결한 직선과 적도의 각도를 경사각이라고 한다. 우리나라를 기준으로 하면 하지때 경사각이 최대가 되고, 동지 때 최소, 춘분과 추분에의 경사각은 0°가 된다. 경사각은 다음의 식(6)으로 계산할 수 있다.

$$\delta = \sin^{-1} \left[\sin \left(\frac{23.45}{360} \cdot 2\pi \right) \cdot \sin \left\{ \frac{2\pi}{365} (d - 81) \right\} \right] \quad (6)$$

여기에서 d 는 연중일로, 1월 1일을 1로, 12월 31일을 365 또는 366으로 한다.

4.1.3 고도각(Elevation angle)

고도각은 수평선과 태양이 이루는 각을 의미한다. 일출시 고도각은 0°이고, 정오시 최대가 된다. 태양이 바로 머리 위에 있을 때는 90°이다. 고도각은 다음의 식(7)로 표현된다.

$$h = \sin^{-1} \{ \sin \delta \cdot \sin L_a + \cos \delta \cdot \cos L_a \cdot \cos(HA) \} \quad (7)$$

여기에서 δ 는 경사각, L_a 는 위도, HA 는 시간각을 의미한다.

4.1.4 방위각(Azimuth angle)

방위각은 정북방향을 기준으로 태양광이 오는 방향과의 각도를 의미한다. 하루 중에 변화하며, 춘분과 추분 때 일출시에는 90°, 일몰에는 270°를 이룬다. 방위각은 다음의 식(8)으로 표현된다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sin \delta \cdot \cos L_a - \cos \delta \cdot \sin L_a \cdot \cos(HA)}{\cos(90 - L_a + \delta)} \right\} \quad (8)$$

4.1.5 태양광 패널에 입사되는 태양광량

태양광 패널의 설치각도에 따라 입사되는 태양광량이 달라지므로 각도에 따라 출력 또한 변화한다. 우리나라 육상에서는 30~36° 사이에 설치하는 것이 가장 발전 효율이 높다. 특정 각도로 설치된 태양광 패널에 입사되는 광량은 다음의 Fig 10 과 식(9)로 구할 수 있다.

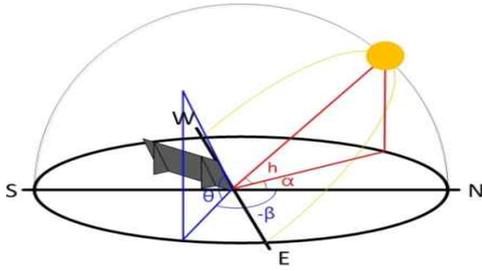


Fig. 10 Installation parameters of solar panel

$$S_{PV} = S_{direct} \{ \cos h \cdot \sin \theta \cdot \cos(\beta - \alpha) + \sin h \cdot \cos \beta \} \quad (9)$$

S_{PV} 는 태양광 패널에 입사되는 태양 광량, S_{direct} 는 지표면에 입사되는 태양 광량, h 는 고도각, θ 는 태양광 패널의 설치 각도, α 는 태양의 방위각 β 는 태양광 패널의 방위각을 의미한다. 이상의 내용을 바탕으로 45°로 각각 다른 방향을 향하도록 설치한 태양광 패널 두 장에 대해 입사되는 태양광량을 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 1에 나와 있으며, 결과는 Fig 11와 같다.

Table 1 Simulation condition(1)

위치	위도	35.04°
	경도	129.05°
표준시		9
날짜		6월 21일
설치각도	모듈 1	45°
	모듈 2	45°

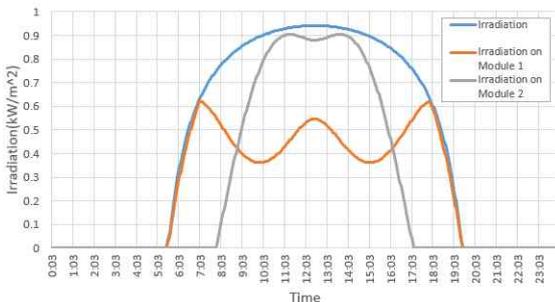


Fig. 11 Irradiation on panel 1 and panel 2

여기에서 파란색 선은 지표면에 입사되는 태양광량을 의미하고, 주황색과 회색선이 각각 태양광 패널 1과 패널 2에 입사되는 광량을 의미한다.

4.2 태양광 패널 시뮬레이션

태양광 패널은 Matlab Simulink로 Fig 12와 같이 구성하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 모델은 광량입력부 (irradiation), 태양광 패널부(solar panel), 특성곡선 출력부

(curve display), 솔버설정부(solver configuration)로 구성된다.

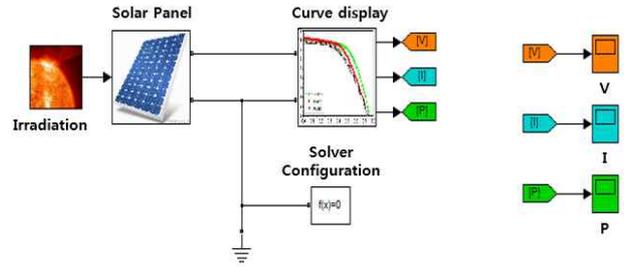


Fig. 12 Simulation model of solar generation system (single panel)

다음 Fig 13는 태양광 패널부의 내부 구조 그림이다. 36개의 태양전지모듈(solar cell)로 구성되어 있다.

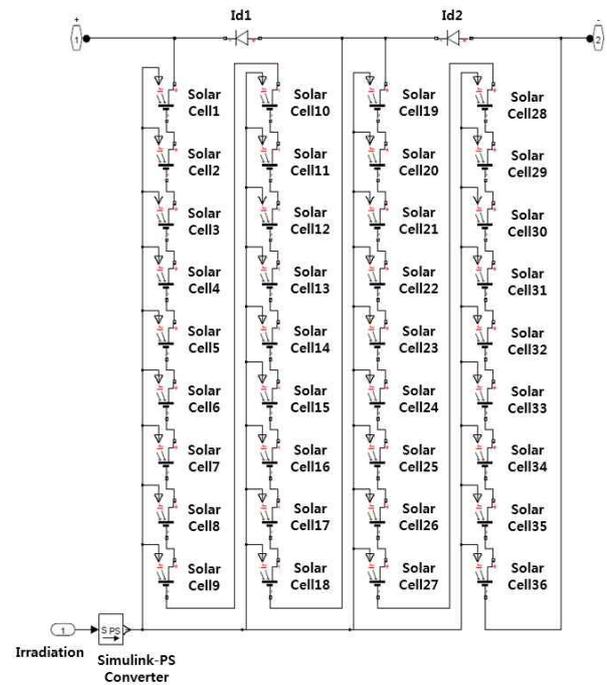


Fig. 13 Simulation model of solar panel

다음 Fig 14와 Fig 15은 이상의 모델을 바탕으로 단일 태양광 패널을 시뮬레이션한 결과이다.

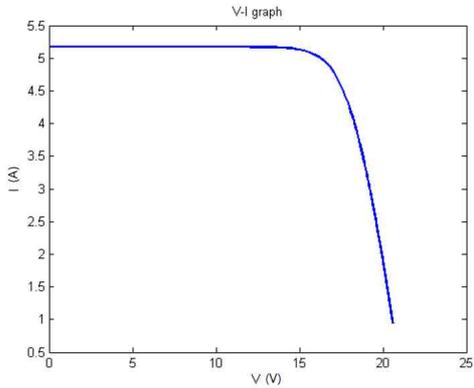


Fig. 14 V-I curve of solar panel

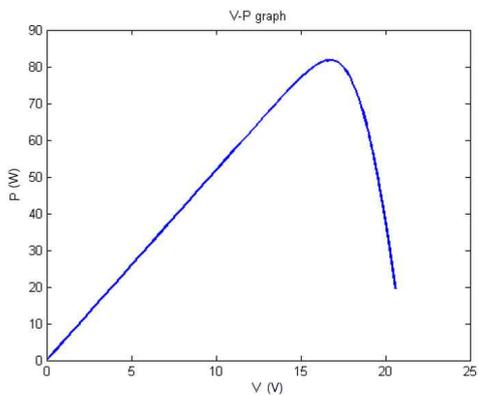


Fig. 15 V-P curve of solar panel

4.3 광량차이와 GMPP의 관계 시뮬레이션

Fig 16은 부분음영현상을 확인하기 위해 두 개의 태양광 패널을 직렬연결한 모델이다.

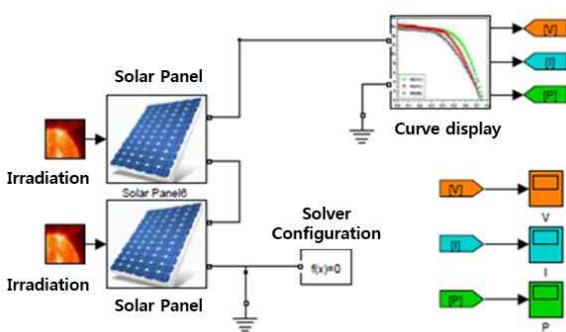


Fig. 16 Simulation model of solar generation system (dual panel)

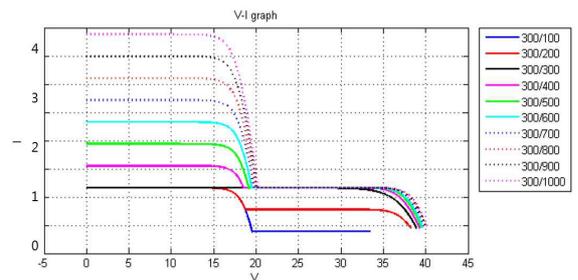
광량차이에 따른 특성곡선의 변화와 GMPP의 이동에 대해 확인하기 위해 태양광 패널 1에 입사되는 광량이 $100 W/m^2$ 일 때, 패널 2에 입사되는 광량을 $100 W/m^2$ 에서 100단위로 $1000 W/m^2$ 까지 변화시켜가며 시뮬레이션을 하였으며, 패널 1의

광량 또한 $100 W/m^2$ 에서 100단위로 $1000 W/m^2$ 까지 변화시켰다. 총 100번의 시뮬레이션이 수행되었다.

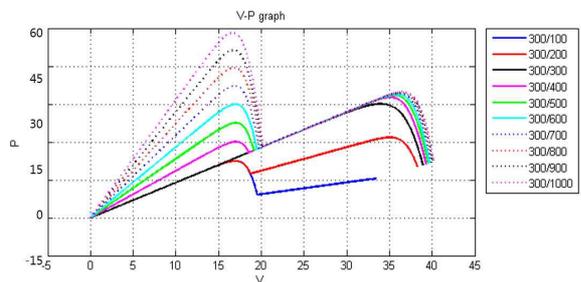
Table 2 Simulation condition(2)

항목	Panel 1	Panel 2
광량 (W/m^2)	100	100~1000
	200	100~1000
	300	100~1000
	400	100~1000
	500	100~1000
	600	100~1000
	700	100~1000
	800	100~1000
	900	100~1000
	1000	100~1000
온도($^{\circ}C$)	25	

수행된 100번의 시뮬레이션을 바탕으로 GMPP의 위치와 태양광량의 관계를 분석하였다. 그 중 대표적인 예로 GMPP의 위치가 오른쪽, 왼쪽, 양쪽이 비슷하게 나타나는 세 가지 상태를 선정하였으며, 앞 선 상태에 해당되는 패널 1에 입사되는 광량이 $300 W/m^2$, $500 W/m^2$, $700 W/m^2$ 인 경우에 대해서 시뮬레이션 결과를 다음 Fig 17~19에 정리하였다.



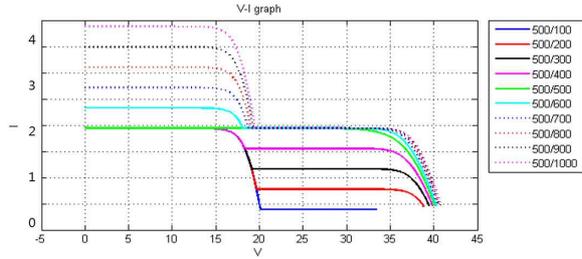
(a) V-I curve



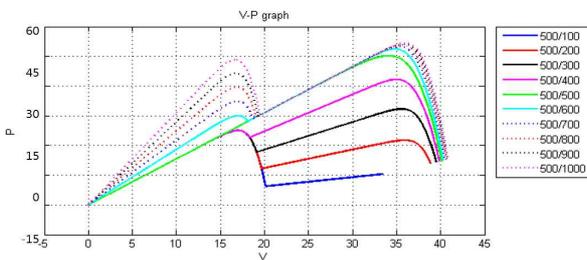
(b) V-P curve

Fig. 17 Characteristic curve in case of $300 W/m^2$ on array 1

Fig 17을 보면 패널 2에 입사되는 광량이 $100 W/m^2$ 일 때와 $700 W/m^2$ 이상일 때는 GMPP가 왼쪽에, 패널 2에 입사되는 광량이 $200 \sim 600 W/m^2$ 사이일 때는 GMPP가 오른쪽에 발생한다.



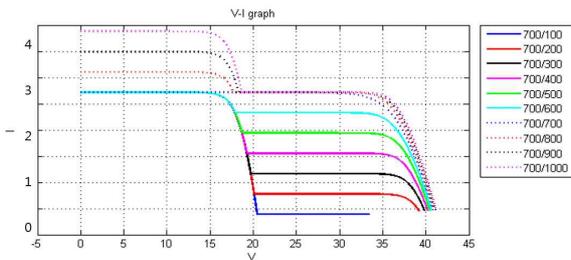
(a) V-I curve



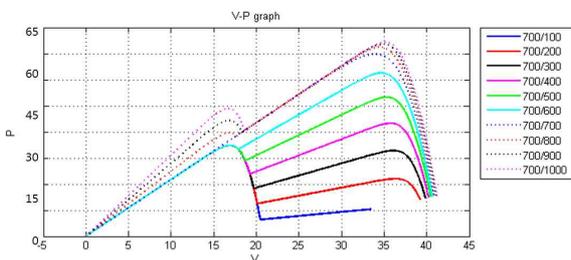
(b) V-P curve

Fig. 18 Characteristic curve in case of $500 W/m^2$ on array 1

Fig 18를 보면 패널 2에 입사되는 광량이 $100 \sim 200 W/m^2$ 일 때 GMPP가 왼쪽에, 패널 2에 입사되는 광량이 $300 W/m^2$ 이상일 때는 GMPP가 오른쪽에 발생한다.



(a) V-I curve



(b) V-P curve

Fig. 19 Characteristic curve in case of $700 W/m^2$ on array 1

Fig 19을 보면 패널 2에 입사되는 광량이 $100 \sim 300 W/m^2$ 사이 일 때 GMPP가 왼쪽에, 패널 2에 입사되는 광량이 $400 W/m^2$ 이상일 때는 GMPP가 오른쪽에 발생한다.

이상의 내용을 바탕으로 광량비에 따른 MPP의 위치를 표시하면 다음 표와 같이 나타난다.

Table 3 Irradiation ratio and position of MPP

	R_{irr} (%)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P_{LMPP}/P_{GMPP}	0.23	0.23	0.68	0.90	0.89	0.76	0.66	0.59	0.53
GMPP	Left	Left	Left	Left	Right	Right	Right	Right	Right
V_{mppL}/V_{oc}	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
V_{mppR}/V_{oc}	0.91	0.90	0.89	0.88	0.86	0.85	0.84	0.82	0.81

여기에서 $R_{irr} = \frac{G_2}{G_1}$, 단, $G_1 \geq G_2$ 으로 R_{irr} 의 값이 작을수록

광량의 차이가 많이 나고, 클수록 광량의 차이가 작은 것을 의미한다. 시뮬레이션 결과 R_{irr} 이 45% 이하에서 GMPP가 왼쪽에 나타나며, 45% 이상에서는 오른쪽에 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 양방향으로 태양광 패널을 설치할 시에는 육상 태양광 발전 시스템 보다 광량 차이가 적게 나도록 설치각도를 설계할 필요가 있다.

Table 4 Simulation results of generated power

설치각도	0	5	10	15	20	25
평균 광량비	1	0.88	0.77	0.67	0.58	0.49
패널 1의 발전량 (kWh)	0.52	0.48	0.44	0.40	0.35	0.30
패널 2의 발전량 (kWh)	0.52	0.55	0.58	0.61	0.63	0.65
평균 발전량 (kWh)	0.52	0.55	0.58	0.60	0.63	0.33
설치각도	30	35	40	45	50	55
평균 광량비	0.41	0.32	0.24	0.16	0.09	0.05
패널 1의 발전량 (kWh)	0.24	0.19	0.13	0.07	0.02	0.01
패널 2의 발전량 (kWh)	0.66	0.66	0.67	0.66	0.65	0.63
평균 발전량 (kWh)	0.25	0.19	0.13	0.07	0.02	0.01

태양광 패널의 설치 각도를 0°에서 90°까지 변화시켜가며 일일 발전량을 분석하였다. 앞서 일일 광량 시뮬레이션을 통해 도출된 광량을 태양광 어레이 모델에 입력하여 결과를 도출하였다. 다음 Table 4는 각도에 따른 평균 광량비와 각 패널당 평균발전전력, 그리고 서칭 가능한 범위에서 평균발전전력을 나타내었다. 여기에서 평균 광량비는 앞서 4.3에서 설명한 R_{irr} 을 의미하며, 패널 1의 발전량은 패널 1만 단독으로 설치하였을 때의 MPP에서 발전량, 패널 2의 발전량은 패널 2만 단독으로 설치하였을 때의 MPP에서 발전량을 의미한다. 평균 발전량은 패널 1과 2를 직결연결 하였을 때 서칭 가능한 범위 (배터리 전압 이상)에 존재하는 MPP의 발전량을 의미한다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면, 단일 패널의 발전량의 최고치는 패널 1의 경우 0°에서, 패널 2의 경우 40°에서 나타난다. 하지만 두 패널을 직결 연결한 태양광 발전 시스템의 경우에는 20°에서 출력이 가장 높았다. 이는 육상용 태양광 발전 시스템의 경우 40°에서 가장 높은 효율을 보이나, 일점 계류용 해양플랜트의 태양광 발전 시스템의 경우, 20°로 설치하는 것이 더 높은 효율을 얻을 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

해상용 태양광 발전 시스템의 경우, 육상 태양광 발전 시스템과 달리 태양광 패널에 입사되는 광량이 파랑에 의한 구조물의 흔들림이나 회전으로 지속적으로 변화하게 된다. 따라서 SPM 시스템이나 부이 등의 해양 구조물에 설치되는 태양광 발전 시스템은 태양광 패널을 여러 방향으로 설치하여 부조일에 대비하고 안정적인 전력을 얻을 수 있게 시스템을 구성하는 것이 제안된다.

본 논문에서는 태양광 패널을 모델링하고 일일 광량에 따른 태양광 어레이의 발전량 변화를 시뮬레이션 하였다. 먼저 태양광 패널 간의 입사되는 광량이 차이가 나게 될 경우 부분 음영 효과에 의해 GMPP와 LMPP의 발생으로 최대전력점을 추종하지 못하는 결과가 발생한다. 특히 태양광 패널 간의 광량차이가 클 때(광량비 40% 이하)에는 최대전력점이 배터리보다 낮은 전압 범위에 위치하여 MPPT 제어로 추종하지 못하는 것을 확인하였다. 두 번째로 부분음영현상이 발생하기 쉬운 해상 태양광 발전 시스템에서는 설치각도를 줄여 기존 육상 태양광 발전 시스템 보다 두 패널 간의 광량 차이를 적게 해야할 필요가 있음을 확인하였다. 세 번째로 설치각도에 따른 발전량 시뮬레이션을 통해 해상 태양광 발전 시스템의 패널 설치 각도를 육상에서 제안되는 30~36°가 아닌 20°에서 높은 발전량을 보이는 것을 확인하였다.

References

[1] Bluewater Turret Buoy - Technical Description,

<http://www.bluewater.com/wp-content/uploads/2013/04/digitale-brochure-TurretBouy-Tech-description.pdf>, Accessed October 17, 2017.

- [2] Choi, Y. K., Lee, N. H., Kim, K. J. and Cho, Y.(2013), "A Study on the Influence to Solar Radiation by Changing the Azimuth and Tilt of a Photovoltaic Array," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 5, pp. 712-716.
- [3] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H.(2011). Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. JOURNAL OF POWER ELECTRONICS, Vol. 11, No. 2, pp. 179-187.
- [4] Lee, Y. S., Kim, N. I., Jeong, S. W. and Gim, J. H.(2011), "MPPT Control Method comparison of the Stand-alone PV system", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 1, pp. 75-79.
- [5] Lee, J. Y., Yang, H. K., and Oh, J. S.(2015), "The Study on Effects of Partial Shading on PV System applied to the Offshore Plant" Journal of the Korea Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 152-158.
- [6] PVCEDROM(2016), <http://pveducation.org/pvcedrom>, Accessed November 1, 2016.
- [7] Ramaprabha, R. and Mathur, B. L.(2009), Impact of partial shading on solar PV module containing series connected cells. International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 2, No. 7, pp. 56-60.
- [8] Shannan, N. M. A. A., Yahaya, N. Z., & Singh, B. (2013), "Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. In Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)", 2013 IEEE International Conference on, Vol. 1, No. 1, pp. 210-214.
- [9] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R.(2009), "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208.
- [10] Yu, G. J., Kim, K. H., Jung, Y. S. and Kim, Y. S.(2001) "A Study on the MPPT Control Algorithm and Efficiency Evaluation Method," THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, Vol. 6, No. 2, pp. 164-172.

Received 11 August 2017

Revised 1 December 2018

Accepted 31 January 2018

