



[2016-12-PV-002]

# 태양광 발전시스템에서 PV의 부분 음영에 따른 부정합 손실 분석 및 개선방안 고찰

윤병근<sup>1)</sup> · 김승연<sup>1)</sup> · 최상백<sup>2)</sup> · 진용수<sup>2)</sup> · 윤 철<sup>1)</sup> · 권우현<sup>1)\*</sup>

## PV Module Mismatch Power Loss Analysis by Partial Shade and Study for Improving the Power Loss

ByungKeun Yoon<sup>1)</sup> · SeungYeon Kim<sup>1)</sup> · SangBack Choi<sup>2)</sup> · YongSu Jin<sup>2)</sup> · Chul Yun<sup>1)</sup> · WhooHyen Kwon<sup>1)\*</sup>

Received 31 May 2016 Revised 19 August 2016 Accepted 19 August 2016

**ABSTRACT** Generally PV power generation system consist of parallel connection of the PV strings which serially connected PV modules. Partial shading has effect on efficiency of PV power generation system, causing mismatch between PV strings. Compensation methods to reduce the mismatch loss have been investigated. these methods prefer to compensate the shaded PV modules increase system cost PV module weight. This paper suggests new method to reduce mismatch loss by compensating voltage to the string not to PV modules. Recognition of mismatch string is by comparing current between strings. only undervoltage is variably compensated to shaded string with low voltage source. imulation results with MATLAB/SIMULINK confirms the improvement of generation efficiency and compensation profit ratio.

**Key words** PV array(태양광 어레이), PV string(태양광 스트링), Partial shade(부분 음영), Voltage compensate(전압보상), MPPT control(최대 전력점 제어)

### Nomenclature

$V_r$  : reverse bias voltage  
 $V_{bd}$  : bypass diode forward voltage  
 $V_m$  : max voltage at maximum power  
 $I_m$  : max current at maximum power  
 $V_{oc}$  : open-circuit voltage  
 $I_{sc}$  : short-circuit current  
 $P_{max}$  : maximum power of PV

### subscript

PV : photovoltaic  
 MPP : maximum power point  
 MPPT : maximum power point tracking

### 1. 서론

최근 환경오염, 지구 온난화로 인한 이상기후 발생과 화석 연료의 고갈로 인해 에너지원에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라서 세계 각국은 지속적인 대체에너지원으로 신재생에너지 개발과 보급에 주력하고 있다. 이 중 태양광 에너지는 무공해의 무한한 에너지원으로서 신재생 에너지

1) School of Electronic Engineering KyungPook National University E-mail: whkwon@ee.knu.ac.kr  
 Tel: +82-53-950-5526 Fax: +82-53-950-5505

2) Digital Korea Co. LTD.

지 분야에서 많은 각광을 받고 있다.<sup>[1~2]</sup>

그러나 태양광 발전시스템은 다른 신재생에너지보다 초기 설치비용이 높은 것에 반해 효율 및 에너지밀도가 낮아 발전단가가 높은 단점이 있다.<sup>[3]</sup> 따라서 태양광 발전시스템의 경제성을 확보하기 위해서 태양전지의 효율 증대, 생산단가 절감과 같은 새로운 부품을 개발하려는 노력과 태양광 발전시스템의 발전효율을 증가시키는데 관심이 집중되고 있다.<sup>[4]</sup>

태양광 발전시스템의 발전효율을 높이기 위해서는 전력 변환시스템의 변환효율을 높이거나 태양광모듈(PV)이 최대 전력 점에서 운전하게 하는 MPPT제어 및 PV모듈간의 부정합손실(mismatch loss)을 줄이기 위한 연구가 지속되고 있다.<sup>[5~7]</sup>

PV모듈간의 부정합은 동일한 모델의 PV모듈로 태양광 발전시스템을 구성하더라도 PV모듈간의 전기적 특성차이로 인해 시스템 전체의 최대출력전력이 각 PV모듈간의 최대출력전력의 합 보다 작아지게 되는데 그 차이를 부정합손실이라고 한다. PV모듈간의 출력 차이는 제조공정에서 발생하는 오차, 장기간 사용으로 인한 시스템의 성능저하, 구름이나 건물에 의한 부분적인 그림자, 모듈 설치 고도각의 차이, 온도 차이와 같은 외부환경 차이로 인해 발생한다.<sup>[8~10]</sup>

구름이나 태양의 일사량 및 모듈 설치 고도각의 차이로 인한 부정합 손실을 막기 위해 태양의 위치를 단순한 계산으로 태양의 적위와 시간 방정식을 계산하는 방법, 황도와 경도, 경사, 적위, 적경, 천정의 거리, 태양의 방위 등의 계산을 통한 태양광 추적식 방법 등이 제안되었다.<sup>[7,11~14]</sup>

태양광 발전시스템은 원하는 출력 전력을 얻기 위해 PV모듈을 직·병렬로 연결하여 사용한다. 원하는 전압을 얻기 위해 PV모듈을 직렬로 연결하는데 이를 스트링(string)이라고 하고 원하는 전류를 얻기 위해 직렬로 연결된 PV스트링을 병렬로 연결하는데 이렇게 직·병렬로 연결된 PV모듈을 어레이(array)라고 한다. 이 PV어레이에 건물의 그림자나 낙엽 등과 같은 이물질에 의해 부분적인 음영이 발생하면 PV스트링 간에 그리고 PV어레이 간에 부정합이 발생한다.

부분 음영의 의한 부정합은 시스템의 발전 효율을 악화시키고 PV모듈의 성능 및 수명을 단축시키는 요인으로 부정합 손실을 개선하기 위한 연구가 지속되고 있다.<sup>[15~19]</sup> 시

스템 차원에서의 접근 방법으로는 모듈 내장형 인버터, 분산형 인버터방법<sup>[16]</sup>과 모듈 내장형 DC-DC 컨버터<sup>[17~18]</sup>등이 대안으로 제시되었다. 그러나 PV모듈에 설치되는 컨버터로 인해 모듈의 크기, 무게 및 전력손실이 증가하게 된다. 뿐만 아니라 전류가 부족한 모듈의 특성을 변화시켜 전류를 증가하면 모듈의 전압이 감소하여 또 다른 부정합이 발생하게 되는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위하여 음영에 따라 PV모듈의 직·병렬 구조를 변경하는 방법<sup>[19]</sup>, 음영이 발생한 모듈에 부족한 전류만큼 보상하는 방법이 제안되었다.<sup>[8,18]</sup> 그러나 필요한 만큼의 전류를 보상하는 방법은 보상에 의한 추가적인 부정합은 막을 수 있지만 전류를 보상하기 위해 각 모듈에 DC-DC컨버터를 설치해야한다는 문제점과 음영이 발생한 모듈을 정확하게 분별하는데 어려움이 따른다. 또한 시시각각 변화하는 기후에 실시간으로 보상을 하는데 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 PV모듈에 부분적인 음영이 발생했을 때 PV모듈단위가 아닌 병렬 연결된 스트링 단위로 부분 음영이 발생한 PV스트링에 부족한 전압만을 직렬 보상으로써 부정합 손실을 보상하고 시스템 전체의 발전효율을 증가시키기 위한 방법을 제시한다. 스트링간의 부정합 판단은 스트링 전류로 판별하며, 저 전압으로 부족전압만을 가변 공급하는 단순하면서도 안전한 보상 방식을 제시한다. 2장에서 PV스트링과 PV어레이에 부분 음영에 의한 동특성과 부정합에 따른 전력손실을 분석하고 3장에서는 제안된 PV스트링의 부정합 보상기법을 설명하고 4장에서는 모의실험을 통하여 발전효율 증대효과 및 보상이익률 등의 성능을 확인한다.

## 2. 음영에 따른 PV 동특성

태양광 발전시스템에 영향을 미치는 요인으로는 태양의 일사량, 음영이 진 모듈의 수, PV모듈과 바이패스 다이오드의 상호 연결 상태이다. 본 장에서는 이러한 요인들에 의한 PV모듈의 동특성을 살펴본다.<sup>[20]</sup>

### 2.1 음영에 따른 PV스트링 동특성

태양광 발전시스템에서 원하는 발전전압을 만들기 위해

동일한 특성의 모듈을 직렬로 연결한다. 그리고 발전전압의 크기에 따라 직렬로 연결된 스트링의 모듈 개수가 결정된다.

본 절에서는 10개의 PV모듈로 구성된 하나의 스트링에 모듈 일사량 변화에 따른 스트링의 동특성을 확인하고, 음영이 발생한 모듈의 개수에 따른 스트링의 동특성과 바이패스 다이오드의 유무에 따른 동특성을 확인한다.

2.1.1 일사량 변화에 따른 스트링 동특성

태양의 일사량 변화에 따른 스트링 동특성을 확인하기 위해 하나의 스트링 중 8개의 모듈에는 최대일사량인 1000 [W/m<sup>2</sup>]을 나머지 2개의 모듈에는 최대일사량의 100%~40%로 즉 1000[W/m<sup>2</sup>]~ 400[W/m<sup>2</sup>]감소하면서 스트링의 전압-전류(V-I), 전압-전력(V-P) 특성곡선을 확인하였다. Fig. 1은 스트링의 V-I, V-P 특성곡선을 나타내고 있다.

Fig. 1의 V-I특성곡선에서 PV모듈에 일사량이 감소할 수록 스트링의 단락전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 결과로 V-P특성곡선에서 스트링의 출력 전력이 감소할 뿐만 아니라 MPP가 하나 이상 발생하는 것을 확인할 수 있다.

2.1.2 음영 모듈의 수와 바이패스 다이오드에 의한 스트링 동특성

스트링에서 음영이 발생한 모듈의 수에 따른 스트링의 동특성을 확인하기 위해 스트링에서 하나의 모듈에서 네 개의 모듈에 음영을 가하면서 스트링의 V-P, V-I특성곡선을 확인하였다. 이때 음영이 없는 모듈은 최대일사량인 1000[W/m<sup>2</sup>]를, 음영이 진 모듈은 최대일사량의 40% 즉 400[W/m<sup>2</sup>]의 일사량을 주었다. Fig. 2는 스트링의 음영

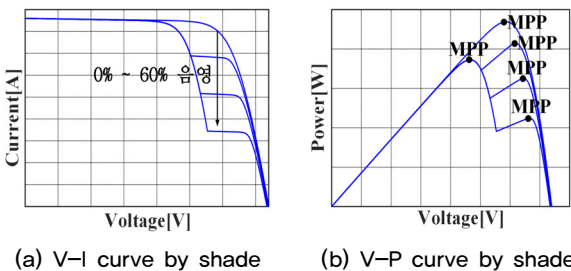


Fig. 1. String characteristic curve by shade

조건과 그에 따른 스트링의 V-I, V-P특성곡선이다. 조건 ①~⑤는 음영이 진 모듈의 수에 따른 특성이고 조건 ⑥은 하나의 모듈에 음영이 지고 바이패스 다이오드를 제거한 조건이다.

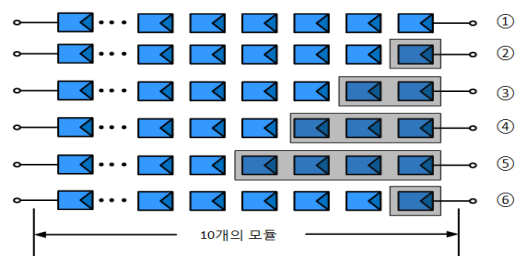
Fig. 2(b)에서 스트링에 음영이 발생하면 스트링 전류는 음영이 발생한 모듈에 의해 감소한다. 그러나 발전 전압이 모듈의 개방전압보다 낮아지게 되면 바이패스 다이오드가 작동하여 음영이 있는 모듈은 바이패스 되고 나머지 모듈만 동작하게 된다.

즉, 직렬로 연결된 스트링에 음영이 지면 그 모듈의 단락 전류(I<sub>sc</sub>)가 감소되어 역 바이어스가 인가된다. 결과적으로 음영이 발생한 모듈은 수동소자로 동작하게 되는데 이때 V<sub>r</sub>의 값은 식 (1)과 같이 된다.

$$V_r \geq V_{bd} (\approx 0.6 V) \tag{1}$$

식 (1)이 만족되면 바이패스 다이오드가 작동하는데 이때 V<sub>m</sub>, I<sub>m</sub>은 정상적으로 작동하는 모듈들에 의해 결정이 된다.<sup>[21]</sup>

조건 ⑥과 같이 바이패스 다이오드가 없으면 PV스트링은 음영이 발생한 모듈의 가장 나쁜 특성의 전류와 전압으로 동작하게 되는데 이는 PV모듈을 국부적으로 가열시켜 모듈에 돌이킬 수 없는 손상을 야기할 수 있다.<sup>[20]</sup>



(a) shade condition on PV

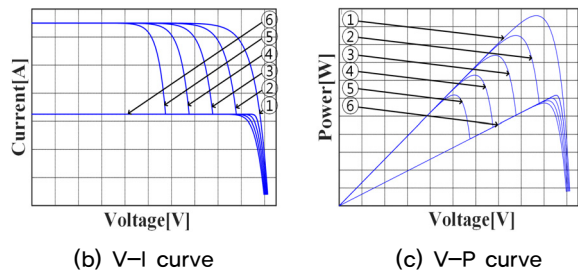


Fig. 2. String characteristic curve by number of shade modules

## 2.2 음영에 따른 PV어레이 동특성

태양광시스템에서 원하는 크기의 전류를 만들기 위해 PV스트링을 병렬로 연결한다. Fig. 3은 PV스트링을 병렬로 연결한 PV어레이이다.

Fig. 3의 PV어레이에서 스트링2에만 60%의 음영을 하나의 모듈과 두 개의 모듈에 인가하여 각각 특성을 비교하였다.

Fig. 1과 Fig. 4의 V-I특성곡선과 V-P특성곡선에서 알 수 있듯이 PV스트링이나 PV어레이에 부분음영이 발생하면 각 특성곡선의 MPP가 최소 2개 이상 나타나는 것을 확인할 수 있다. 부분적인 음영으로 인해 2개 이상의 MPP가 생기면 MPPT알고리즘을 적용하는데 어려움이 발생한다.<sup>[22~24]</sup>

## 2.3 PV어레이 부정합 손실 해석

앞서 PV스트링과 PV어레이의 부분 음영에 따른 동특성을 확인하였다. 본 절에서는 PV어레이에 부분음영이 발생했을 때 부정합으로 인한 전력손실을 각 스트링의 V-P특성곡선을 통해 해석한다.

부정합 손실을 해석하기 위해 Fig. 3과 같이 두 개의 스트링이 병렬로 연결된 어레이에서 스트링1에는 음영이 없

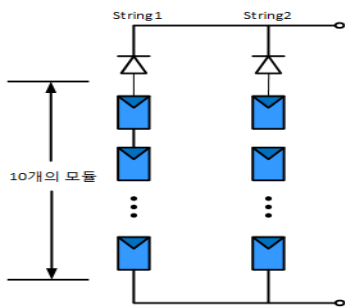


Fig. 3. PV array

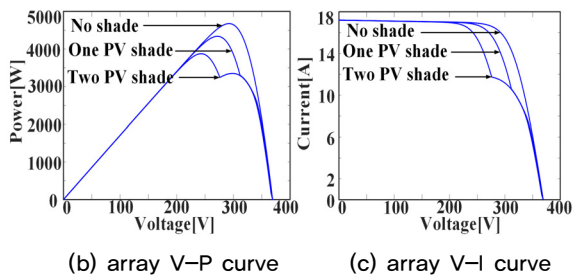


Fig. 4. PV array characteristic curve by shade

고 스트링2에만 하나의 모듈과 2개의 모듈에 각각 60%의 음영을 주었다. 이때 각 스트링의 V-P특성곡선을 비교함으로써 부정합에 따른 전력손실을 계산한다. Fig. 5는 PV어레이의 V-P특성곡선과 스트링2의 특성곡선을 나타내고 있다.

Fig. 5의 PV어레이 특성곡선은 PV스트링의 크기와 비교하기 위해 0.5배 축소하여 그렸다. 따라서 음영이 없을 때는 PV어레이의 MPP인 A, 스트링1과 스트링2의 MPP인 A'는 같은 지점이다. B는 스트링2에 하나의 PV모듈에 음영이 생겼을 때의 MPP를 나타내는데 B1과 B2는 이때 각 스트링의 동작 점을 나타낸다. 즉 스트링2에만 부분적인 음영이 발생했을 때 두 스트링의 합성 MPP는 B가 되고 각 스트링은 최고 전력 점에서 동작하지 못한다. 또한 음영이 없는 스트링1도 부정합으로 인해 전력 손실이 발생하는 것을 알 수 있다. 스트링2의 하나의 모듈에 음영이 발생함에 따라 A와 B의 전력차이는 338[W]가 나게 되는데 이는 본 논문에 사용되는 PV모듈 하나의 출력 전력인 235[W]를 초과하는 전력량이다. 스트링2의 음영으로 인해 PV어레이의 합성 MPP인 A와 B의 차이가 240[W]발생하고, 스트링2의 동작점이 B2'에서 B2로 이동하면서 25[W]의 전력 손실을, 스트링1의 동작점이 A'에서 B1로 이동하면서 73[W]의 추가적인 전력손실이 발생한다.

스트링2에 두 개의 PV모듈에 음영이 발생했을 때도 어레이의 합성 MPP차이인 A와 C 사이에 802[W]의 전력차이가 발생하는데 음영에 의한 스트링2의 전력 손실인 A'과 C2가 481.7[W], 합성 MPP의 동작점에 의한 스트링1의 전력손실인 A'과 C1이 278.1[W], 스트링2의 전력손실인

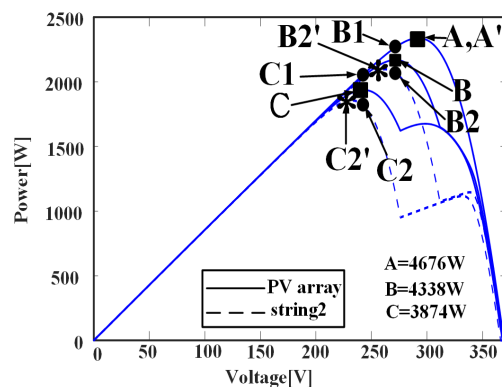


Fig. 5. PV array & string2 V-P curve

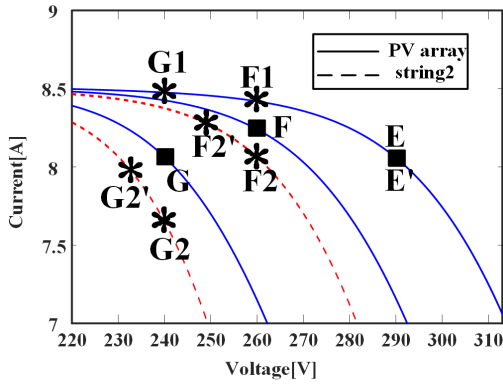


Fig. 6. PV array & string2 V-I curve

C2'과 C2가 42.2[W]의 전력손실이 발생한다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서의 V-I특성곡선 중 MPP주위만 확대하였다. PV어레이의 V-I특성곡선은 Fig. 5와 같이 스트링2의 V-I특성곡선과 비교하기 위해 0.5배의 크기로 그렸다. V-I특성곡선과 같이 음영이 없을 때 어레이의 MPP인 E와 스트링1, 스트링2의 MPP인 E'은 같은 지점에서 만난다. 스트링2의 하나의 모듈에 음영이 발생하면 스트링1의 동작 점은 E에서 F1로 이동하면서 전압은 감소하고 전류는 증가한다. 스트링2는 F2'에서 F2로 이동하면서 전류는 감소하지만 전압은 증가하게 된다.

스트링2에 두 개의 모듈에 음영이 발생하면 스트링1의 동작 점은 E에서 G1로 이동하면서 전류는 증가하고 전압은 감소하지만 스트링2는 G2'에서 G2로 이동하면서 전류는 감소하고 전압은 증가하게 된다.

### 3. PV스트링 부정합 보상방법

Fig. 3과 같이 어레이로 연결된 PV스트링에 부분적인 음영이 발생하면 각 스트링의 전압은 병렬연결로 인해 낮은 스트링 전압이 PV어레이의 출력 전압이 된다. 그러나 어레이의 출력 전류는 각 스트링 전류의 합으로 나타난다.

#### 3.1 음영에 따른 스트링 전류 비교

PV어레이의 부분 음영에 의한 스트링별 전류 비교를 위해 스트링1에는 음영이 없고, 스트링2의 하나의 PV모듈에 60%의 음영이 주어진 상황에서 각 스트링별 전류를 비교하

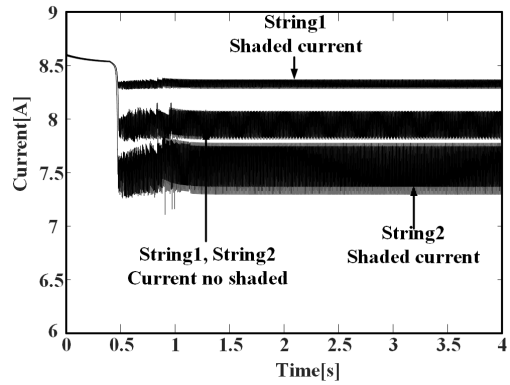


Fig. 7. String current compare by shade

였다. Fig. 7은 각 스트링별 전류를 나타낸다.

Fig. 7의 중간과 파형은 스트링1과 스트링2 모두 음영이 없을 때의 전류파형이다. 이때 스트링1과 스트링2의 전류는 같다. 그러나 스트링2의 하나의 모듈에 음영이 발생하면 Fig. 7의 상단과 같이 스트링1의 전류는 증가하게 되고 스트링2의 전류는 Fig. 7의 하단과 같이 감소하게 된다. 이는 스트링2에 음영이 발생하면 Fig. 6에서 PV어레이의 합성 MPP인 F에서 운전하면서 스트링1의 MPP인 E'에서 F1로 스트링2의 MPP인 F2'에서 F2로 운전점이 옮겨가기 때문이다.

#### 3.2 부정합 보상방법

스트링간의 부정합을 보상하기 위해서는 먼저 음영에 의해 부정합이 발생한 스트링을 찾아야 한다. 3.1절에서 두 스트링간의 전류비교를 통해 하나의 스트링에 음영이 발생하면 음영이 발생한 스트링의 전류는 감소하고 음영이 발생하지 않은 스트링의 전류는 증가하는 것을 확인하였다. 이로부터 착안하여 스트링1의 전류에서 스트링2의 전류의 차를 구하면 그 결과로부터 음영이 발생한 스트링을 구별할 수 있다.

음영이 발생한 스트링을 구별하여 음영이 발생한 스트링의 전류가 음영이 발생하지 않은 전류를 추종하도록 음영이 발생한 스트링에 전압을 직렬보상해주면 음영에 따라 능동적인 전류 보상이 이루어진다.

Fig. 8은 음영이 발생한 스트링을 구별하여 음영이 발생한 스트링에 전압을 보상하기 위한 신호 흐름도이다.

두 스트링의 전류를 비교하여 음영이 발생한 스트링에 전압보상을 한다. 만일 보상한 전압으로부터 보상전력을 계산한 후 이 보상전력이 시스템의 증가한 전력보다 크면

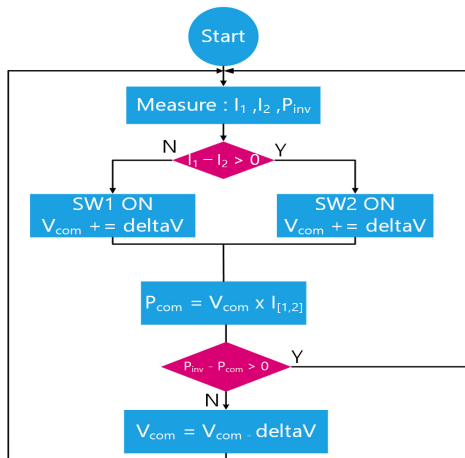


Fig. 8. Voltage compensate flow chart

과보상이 일어난다. 따라서 과보상이 일어나면 증가한 전압의 한 스텝 크기를 빼주어 과보상을 피한다.

#### 4. 모의실험

MATLAB/SIMULINK를 통해 앞서 제안한 전압보상방

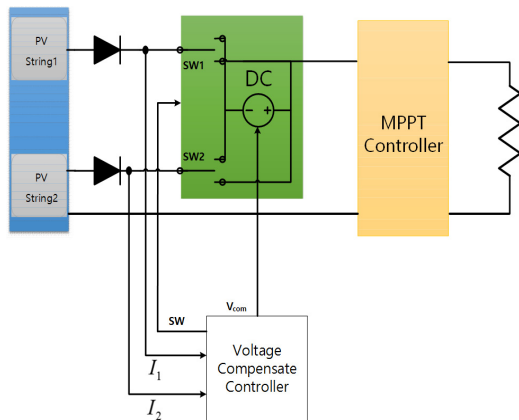


Fig. 9. Voltage compensate block diagram

Table 1. PV module parameter

항목	파라메타
$P_{max}$	234.986W
$V_m$	29.3V
$I_m$	8.02A
$V_{oc}$	37V
$I_{sc}$	8.52A
Cell Number	34 Cells

법의 성능을 검증한다. 모의실험에 사용된 PV모듈의 파라메타는 Table 1과 같다.

음영이 발생한 스트링에 전압을 보상하기 위한 블록 다이어그램은 Fig. 9와 같다.

#### 4.1 모의실험 구성

모의실험의 구성은 병렬로 연결된 두 개의 PV스트링, 부정합 보상을 위한 전압 보상기, MPPT 제어기, 그리고 부하저항으로 이루어져있다.

#### 4.2 전압보상에 의한 V-P특성곡선

두 개의 스트링이 병렬로 연결된 PV어레이에서 스트링2에만 부분적인 음영이 발생하더라도 스트링1과 스트링2 모두 원래의 MPP보다 낮은 영역에서 동작하고 있는 것을 확인하였다. 따라서 음영이 발생한 스트링2에 부족한 전압만큼 보상을 해주면 두 스트링간의 부정합을 보상할 수 있다. Fig. 10은 스트링2에 하나의 모듈에 음영이 발생했을 때의 V-P특성곡선과 스트링2에 전압을 보상한 후의 V-P특성곡선을 나타내고 있다.

스트링2의 하나의 모듈에 음영이 발생했을 때 음영이 발생한 스트링에 하나의 PV모듈  $V_m$  전압만큼 보상을 해주면 PV어레이의 V-P특성곡선은 음영이 없을 때와 MPP가 같아지는 것을 확인할 수 있다.

음영이 발생한 스트링2의 전류가 스트링1을 추종하도록 스트링2에 전압을 보상하면 Fig. 11에서와 같이 스트링2의 전류가 증가하여 음영이 없을 때의 MPP점인 A점에서 만나게 된다.

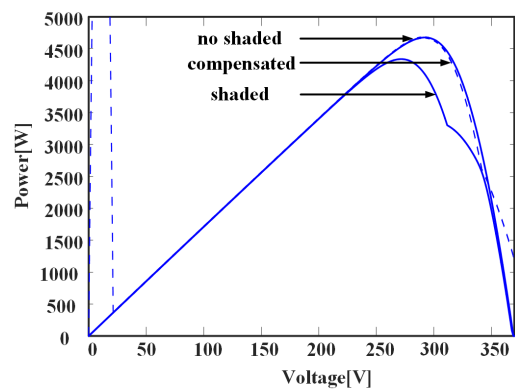


Fig. 10. Voltage compensated V-P curve

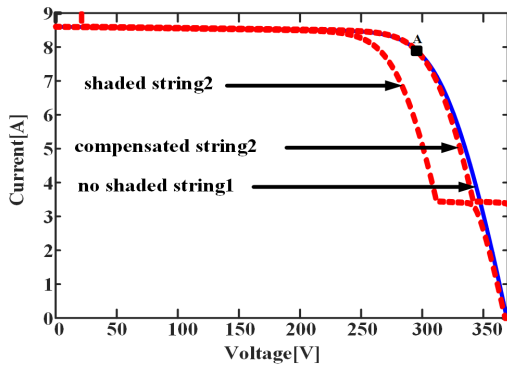


Fig. 11. Voltage compensated V-I curve

### 4.2 전압보상을 통한 출력 전력특성

하나의 스트링에 부분음영이 발생했을 때 음영이 발생한 스트링이 음영이 발생하지 않은 스트링의 전류를 추종하도록 전압을 보상하면 부정합 손실을 보상할 수 있음을 4.1절의 모의실험을 통해 확인하였다. 따라서 본 절에서는 Fig. 9의 구성을 가지는 태양광 발전시스템에서 제안한 전압보상 방법의 타당성을 확인한다.

Fig. 12는 스트링1, 스트링2 모두에 음영이 없을 때의 MPPT제어에 의한 출력 전력과 그에 따른 V-P 특성곡선, 그리고 스트링2에 하나의 PV모듈에 60%음영이 있을 때 MPPT제어에 의한 출력 전력과 V-P 특성곡선을 나타내고 있다. PV어레이에 음영이 없을 경우에는 PV어레이가 최대 전력 점에서 운전하고 있지만 스트링2에 음영이 발생하면 PV어레이가 로컬 MPP에서 운전하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 PV어레이에 음영이 없는 상황에서의 시스템 출력전력, 스트링2의 하나의 모듈에 60%의 음영이 된 상황에서의 출력전력 그리고 음영이 된 상황에서 제한한 방

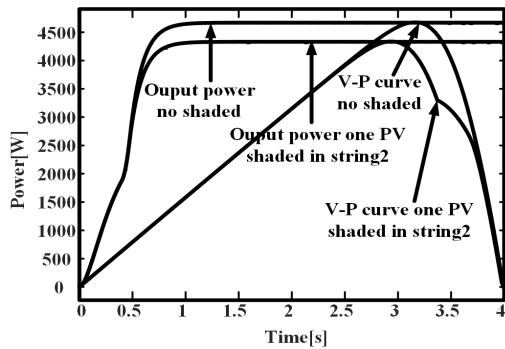


Fig. 12. Output power and V-P curve by shade

법으로 1.2초에 전압 보상을 한 출력전력을 나타내고 있다. 이때 보상전압은 PV하나의 발전전압인  $V_m$ 으로 제한하였다.

음영이 진 스트링의 전류를 스트링1의 전류와 일치하도록 스트링2에 부족전압을 직렬보상하면 Fig. 13과 같이 음영이 없을 때의 출력 전력과 같아진다. 이때 보상에 들어간 보상전력은 240[W]이고, 보상으로 얻어진 전력이익은 336.6[W]가 된다. 즉 투입된 전력량보다 얻는 전력량이 더 커지며, 따라서 보상 이익률은 140%(336.6/240)가 되고 8%(336.6/4333.4)의 발전효율이 증가한다.

Fig. 14는 Fig. 12의 조건에서 각 스트링별 출력 전력과 V-P곡선을 나타내고 있다. 이때 음영이 없을 때의 스트링1과 스트링2는 모두 MPP에서 동작하지만 스트링2에 음영이 발생하면 스트링2는 MPP인 B가 아닌 C에서 동작을 한다. 뿐만 아니라 음영이 없는 스트링1도 MPP보다 낮은 영역인 D에서 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 15에서는 전압보상 후 각 스트링의 출력 전력을 비교하였다. 스트링2의 전압을 보상함으로써 스트링1과

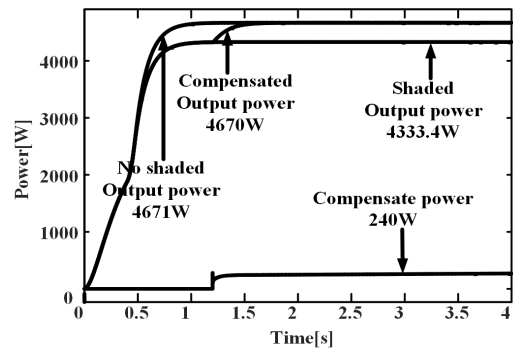


Fig. 13. Output power by voltage compensation

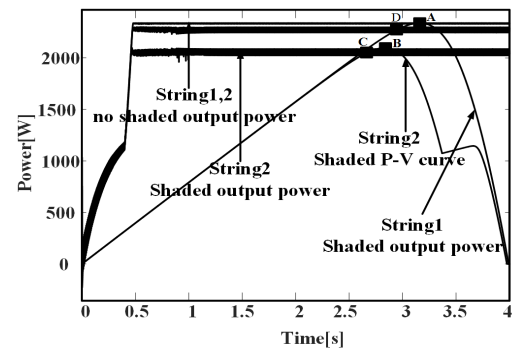


Fig. 14. String power comparison by shade

스트링2의 출력이 증가하면서 음영이 없을 때의 MPP점으로 운전하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 스트링2에 전압을 보상 후 각 스트링의 전류를 비교하였다. 스트링2에 음영이 있을 때에는 스트링1의 전류가 스트링2의 전류보다 크게 나타나지만 1.2초에 스트링2의 전류가 스트링1의 전류를 추종하도록 전압을 보상해 주면 스트링1과 스트링2의 전류가 같아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 스트링2에 4개의 모듈에 60%음영이 있을 때

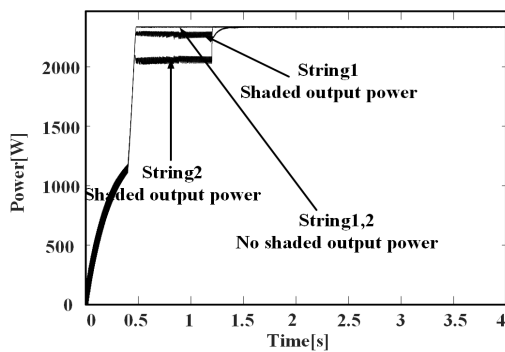


Fig. 15. String power comparison by voltage compensation

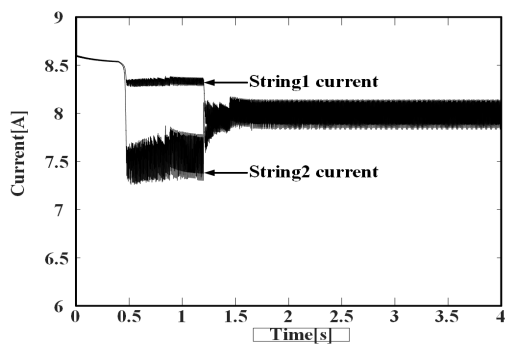


Fig. 16. String current comparison by voltage compensation

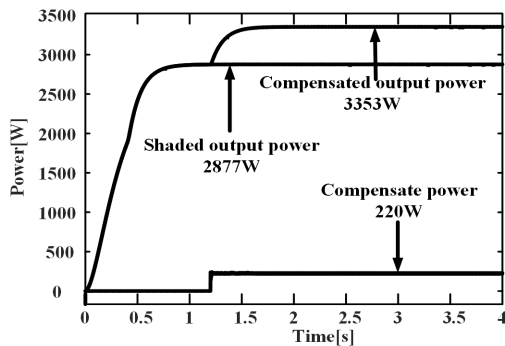


Fig. 17. Compensated output power in condition of 4PV shade

의 출력 전력과 전압보상을 통한 출력 전력을 비교하였다.

이때 전력이익은 476[W], 보상이익은 256[W], 보상이익률은 216%(476/220)이고 발전효율 증대는 17%(476/2877)이다.

Fig. 18은 스트링2에 네 개의 PV모듈에 각각 20%, 40%, 60%, 80%의 음영을 주고 전압보상을 하였다.

이때 전력이익은 476.4[W], 보상이익은 249.3[W], 보상이익률은 210%(476.4/227.1), 발전효율 증대는 17%(476.4/2875.5)이다.

이상의 결과로 스트링에서 음영이 어느 하나의 모듈에 집중적으로 발생할 때 보다 여러 모듈에 분산되어 나타날 때 보상에 따른 보상이익률이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 실 발전시스템에서는 보상전력을 잉여전력으로 사용하거나, 더미 모듈을 활용할 수 있을 것이다. 위의 모의 실험결과로부터 한 스트링의 PV모듈에 각각 다른 음영이 발생한다고 하더라도 음영이 발생한 스트링에 부족전압을 직렬 보상함으로써 태양광 발전시스템의 전체 발전효율이 10%이상 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 과보상과 부족보상 분석

PV어레이에 음영은 구름의 위치나 태양의 고도에 따라 시시각각 변한다. 음영의 정도에 따라 PV스트링에 전압을 보상하기 위해서는 보상을 하는 시점과 보상전압의 크기를 잘 선정해야한다. Fig. 19는 스트링2에 하나의 모듈에 음영이 발생했을 때 최대 보상점인  $V_m$ 보다 낮은 28[V]와 과보상인 40[V]의 전압보상을 통해 부족보상과 과보상의 성능을 확인한다.

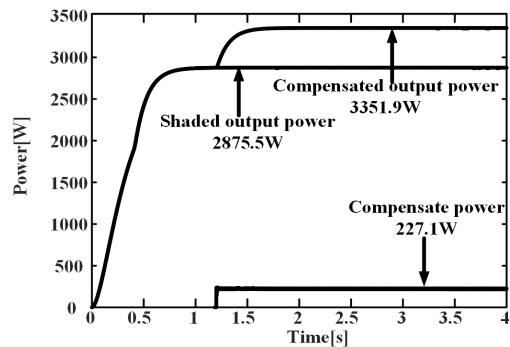


Fig. 18. Compensated output power in condition of 4PV different shade



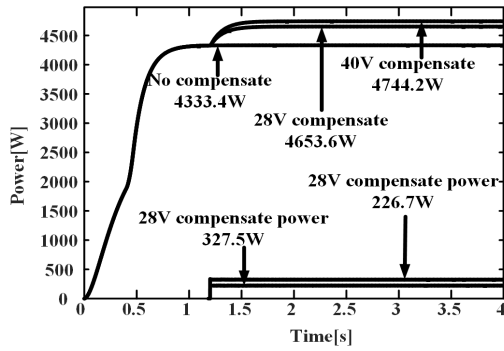


Fig. 19. Output power comparison by overt compensation and under compensation

28[V]의 부족 전압을 보상했을 때 보상 이익은 320.2 [W], 보상 이익률 141%, 보상효율 증대가 6% 발생했다. 40[V]의 과보상을 했을 때는 410.8[W]의 보상이익과 125%의 보상이익률, 보상효율 증대가 9% 발생한다. 전압을 과보상하면 보상효율은 증대하지만 보상이익률이 부족보상보다 낮아진다. 따라서 전압을 보상할 때 과보상이 일어나지 않도록 제한해야할 필요가 있다.

## 5. 결론

태양광 발전시스템은 원하는 출력 전압과 전류를 얻기 위해 PV모듈을 직·병렬로 연결해서 사용하게 된다. PV어레이에 부분적인 음영이 발생하면 각 스트링간의 부정합이 발생하며 이로 인해 태양광 발전시스템의 발전효율이 떨어진다. 본 논문에서는 PV어레이에서 부정합에 의해 발생하는 전력 손실을 각 스트링의 V-P특성곡선을 통해 분석하고 부정합 손실을 보상하기 위한 방법을 제안하였다.

PV어레이의 부정합 손실을 보상하기 위해 병렬로 연결된 PV스트링의 전류를 비교해 음영이 발생한 스트링에 부족전압만을 보상하였다. 음영이 발생한 스트링의 전류가 음영이 발생하지 않은 스트링의 전류를 추종하도록 음영이 발생한 스트링에 부족전압을 보상하면 스트링간의 발생한 부정합 손실을 능동적으로 보상 할 수 있음을 확인하였다.

MATLAB/SIMULINK를 통해 음영이 발생한 스트링에 전압을 능동적으로 보상함으로써 PV어레이에 부분적인 음영이 발생했을 때 태양광발전 시스템의 발전효율과 보상이익률이 10% 이상 증가하는 것으로부터 본 논문에서 제안

된 부정합 보상기법의 타당성을 검증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 2015 3030 012320).

## References

- [1] K. Kurokawa, 2003, "Energy from Desert", Earthscan, London.
- [2] C. J. Winter, R. L. Sizmann, L. L. Van-Hull, 1991, "Solar Power Plants", Springer-Verlag.
- [3] S. D. Kim, "Incorporating the Power Generation Capacities of New and Renewable Energy into Long-Term Electricity Supply Planning", 2005.
- [4] Hyungwoong Seo, Min-Kyu Son, Kyoung-Jun Lee, Jeonghoon Kim, Ji-Tae Hong, Hee-Je Kim, 2008, "A study on the Improvement of the Efficiency of Dye-sensitized Solar Cell using the Laser Scribing and the Grid Electrode", The TRANSACTION OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, Vol. 57, No. 10, pp. 1802-1806.
- [5] K. T. Park, J. S. Choi, D. H. Chung, 2008, "A Novel PV Tracking System Control Considering the Power Loss with Change of Insolation", Journal of the KIEE, Vol. 22, No. 6, pp. 89-99.
- [6] J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, 2012, "Efficiency Analysis of PV Tracking System with PSA Algorithm", Journal of the KIEE, Vol. 26, No. 11, pp. 30-39.
- [7] Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Chul-Ho Jung, Do-Yeon Kim, Byung-Jin Kim, Yong-Sun Jun, Dong-Hwa Chung, 2008, "Development of shadow compensation algorithm for efficiency improvement of photovoltaic tracking system", The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers conference, pp. 411-414.
- [8] Hee-Wook Ahn, Gi-Yob Park, 2012, "Compensation of PV Module Current for Reduction of Mismatch Losses in PV Systems", Journal of the Korean Solar Energy

- Society, Vol. 32, No. 3, pp. 26-32.
- [9] N. D. Kaushika, Anil K. Rai, 2007, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks", *Energy* 32, pp. 755-759.
- [10] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, J. Aguilera, 2010, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses", *Solar Energy* 84, pp. 1301-1309.
- [11] H. J. Noh, D. Y. LEE, D. S. Hyun, 2002, "An improved MPPT converter with current compensation method for small scaled PV-application", *IEEE IES*, Vol. 2, pp. 1113-1118.
- [12] W. A. Lynch, M. Salameh, 1990, "Simple eletro-optically controlled dual axis sun tracker", *Solar Energy*, Vol. 45, pp. 65-69.
- [13] J. W. Spence, 1989, Comments on "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", *Solar Energy*, Vol. 42, No. 4, pp. 393-397.
- [14] R. Walraven, 1978, "Calculating the position of the Sun", *Solar Energy* 20, pp. 393-397.
- [15] A. S. Bahaj, R. M. Braid, P. A. B. James, May 2002, "Post installation optimisation of a building integrated PV system at Southampton University", *Record of 29th IEEE PV Specialists Conference*, pp. 1504-1507.
- [16] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. Aguilera, J. De La Casa, 2010, "Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses: a case study", *EEEIC 2010 9<sup>th</sup> conference*, pp. 37-40.
- [17] G. Walker, P. Sernia, 2004, "Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules", *IEEE Tr. on, Power Electronics*. Vol. 19, No. 4, pp. 1130-1139.
- [18] Hee-Wook Ahn, 2009, "Analysis of Module Mismatch Loss in Solar PV String and Feasibility Study for Improvement Method", *J. of Korean Solar Energy Society*, Vol. 29, No.1, pp.58-63.
- [19] Jae-Sub Ko, Dong-Hwa Chung, 2013, "Reconfiguration of PV Module Considering the shadow Influence of Photovoltaic System", *Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp. 36-44.
- [20] Jin-Deok Kim, 2015, "Improved Power Efficiency using the battery Voltage Compensation for Partially Shaded Photovoltaic System", *KNU school of Electrcial engineering master paper*.
- [21] Seungtae Kim, Kang, Ki-Hwan Kang, Hyungkeun Ahn, Deuk-Yong Han, Gwong-Jong Yu, 2008, "The Electrical Characteristic of Shading Effect in Photovoltaic Module", *The Korean Solar Energy Society conference*, pp. 257-262.
- [22] Young-hyok Ji, Doo-Young Jung, Jun-Gu Kim, Jae-Hyung Kim, Tae-Won Lee, and Chung-Yuen Won, 2011, "A Real Maximum Power Point Tracking Method for Mismatching Compensation in PV Array Under Partially Shaded conditions", *IEEE Tr. on power electronics*, Vol. 26, No. 4, pp. 1001-1009.
- [23] Matthew J. Korytowski, Brandon M. Grainger, 2012, "A Comparative Study of MPPT Method for Distributed Photovoltaic Generation", *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-7.
- [24] Toshihiko Noguchi, Shigenori Togashi, Ryo Nakamoto, 2002, "Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System", *IEEE Tr. On INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 49, No. 1, pp. 217-223.
- [25] Euihwan Kim, sengwon Kang and Jaeon Kim, 2011, "The Long-term Operating Evaluation of the Grid Connected Photovoltaic System" *New & Reneable Energy* Vol. 7, No. 2, pp. 28-35.