

태양광모듈의 모델링 및 성능향상을 위한 최적구성방안에 관한 연구

정종윤¹, 최성식¹, 최홍열¹, 유상원¹, 이인철¹, 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교 전기전자통신공학부

A study on the Optimal Configuration Algorithm for Modeling and Improving the Performance of PV module

Jong-Yun Jeong¹, Sung-Sik Choi¹, Hong-Yeol Choi¹, Sang-Won Ryu¹,
In-Cheol Lee¹, Dae-Seok Rho^{1*}

¹Dept of Electrical Engineering, Korea University of Technology & Education

요약 태양광 모듈은 필요한 발전량을 얻기 위해 태양 전지를 직렬과 병렬로 조합하여 구성하며, 이 모듈은 일사량 및 온도에 따라 발전능력이 크게 좌우되는 특성을 가지고 있다. 또한, 태양광 전원은 건물 또는 나무 등의 주변 환경에 의한 음영과 같은 특수한 상황에 의하여 출력손실이 발생하게 된다. 즉 태양광 전원을 구성하는 태양광 모듈 일부에 부분음영이 발생할 경우, 태양광 모듈의 단락전류가 제한되어 전체 발전량 손실을 초래하고, 열점(Hot-Spot) 현상과 같은 열화현상이 발생하여 모듈의 수명을 단축시킨다. 따라서 본 논문에서는 태양광 모듈의 출력을 향상시키기 위한 태양전지와 바이패스 다이오드의 최적구성 알고리즘을 제시하였다. 또한, 부분 음영에 의한 출력손실을 최소화하기 위하여 태양광 어레이의 회로를 최적으로 구성하는 알고리즘을 제시하였다. 상기 알고리즘을 바탕으로 회로해석 프로그램인 PSIM S/W를 이용하여 태양광 모듈과 태양광 어레이를 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 본 논문에서 제안한 태양 전지와 바이패스 다이오드의 최적구성 알고리즘과 태양광 어레이의 최적구성 알고리즘이 태양광 전원의 성능 향상에 유용함을 확인하였다.

Abstract Solar cells in a PV module are connected in series and parallel to produce a higher voltage and current. The PV module has performance characteristics depending on solar radiation and temperature. In addition, the PV system causes power loss by special situations, including the shadows of the surrounding environment, such as nearby buildings and trees. In other words, an increase in power loss and a decrease in life cycle can occur because of the partial shadow and hot-spot effect. Therefore, this paper proposes the optimal configuration algorithm of a bypass diode to improve the output of a PV module and one of a PV array to minimize the loss of the PV array. In addition, this paper presents a model of a PV module and PV array based on the PSIM S/W. The simulation results confirmed that the proposed optimal configuration algorithms are useful tools for improving the performance of PV system.

Keywords : Renewable energy, PV system, PV module, PV array, Solar cell, Bypass diode, Hot-spot,

1. 서론

태양광전원은 필요한 발전량을 얻기 위해 태양광모듈을 직병렬로 조합하여 전체 시스템을 구성하는데, 일사량 및 온도에 따라 성능이 크게 좌우된다. 일부 태양광전원은 주변 환경을 고려하지 않고 설치되어 건물 또는 나

무 등으로 인한 음영과 같은 특수한 상황에 의해 출력전력의 손실이 발생한다. 태양광모듈을 구성하는 태양전지 하나라도 이상이 발생할 경우, 태양전지의 단락전류로 제한되어 전체 발전량의 손실이 발생하며, 열점(Hot-Spot) 현상과 같은 열화현상으로 모듈의 출력손실 또는 수명을 단축시킨다. 상기 현상으로 인한 출력손실

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology & Education)

Tel: +82-10-2306-2213 email: dsrho@kut.ac.kr

Received November 20, 2015

Revised (1st March 28, 2016, 2nd March 29, 2016, 3rd March 31, 2016)

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

과 모듈의 손상을 방지하기 위하여 태양광모듈에는 바이패스 다이오드가 설치되어 있다. 그러나 태양광모듈의 출력을 결정하는 주요 요소 중 하나인 바이패스 다이오드는 모듈제조사의 편의에 의해서만 구성되고, 다이오드 자체의 효율을 상승시키는 연구만 주로 진행되어지고 있는 실정이다[1-3]. 한편, 태양의 위치 변화에 따라 주변 고층 건물 및 나무 등의 음영이 태양광 어레이를 가리게 되면 해당 어레이의 출력손실이 발생한다. 이러한 환경으로 음영이 고정적으로 어레이에 발생하게 되면, 발전 가능한 시간이 적은 태양광 어레이는 큰 출력손실을 가지게 된다[4-6].

따라서 본 논문에서는 상기 문제점을 해결하기 위하여 기존 태양광모듈의 출력특성을 분석하고, 모듈의 출력 성능을 향상시키기 위하여 태양전지와 바이패스 다이오드의 최적구성을 위한 알고리즘을 제시하였다. 또한, 부분 음영에 의한 태양광스트링의 출력손실을 최소화시키기 위하여 스트링 회로구조 변경 알고리즘을 제시하였다. 상기 알고리즘을 바탕으로 회로해석 프로그램인 PSIM S/W를 이용하여 태양광모듈과 태양광 스트링을 모델링하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광모듈의 구성에 의한 출력특성분석

2.1 태양광모듈의 바이패스 다이오드 구성

일반적으로 태양광모듈의 출력은 일사량과 온도에 큰 영향을 받는다. 태양광모듈은 태양전지 다수를 직렬로 조합하여 구성되며, 이 태양광모듈을 구성하는 태양전지 하나라도 이상이 발생할 경우 출력 손실을 초래한다. 즉, 이상이 발생한 전지의 단락전류(Isc)는 감소하고, 직렬회로 특성에 의하여 이상이 발생한 태양전지의 단락전류가 제한되어 전체 발전량이 감소하게 된다. 또한, 이상이 발생한 전지는 발전원이 아닌 부하로 동작하게 되어, 열점현상에 의한 모듈의 파손 및 열화현상을 발생시킨다. 상기의 현상을 방지하기 위해 현재 상용화된 태양광모듈에는 Fig. 1과 같이 바이패스 다이오드를 설치하여 발전량손실을 최소화시키고 모듈의 열화현상을 감소시키고 있다.

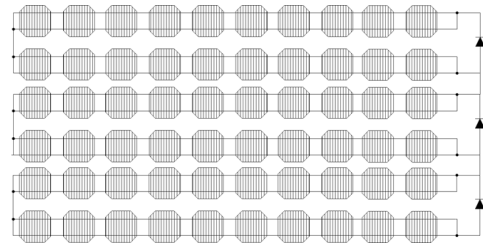


Fig. 1. Configuration of PV module

한편, 현재 주로 사용되고 있는 250[W]급 태양광모듈에는 60여개의 태양전지와 3개의 바이패스 다이오드로 구성되어 있는데, 즉 하나의 바이패스 다이오드는 20개의 태양전지를 담당하고 있다. 따라서 태양광모듈의 기본 구성에 의하여 음영이 생기는 방향에 따라 손실전력의 크기가 변화하여 모듈의 출력 성능을 좌우하게 된다 [7-10].

2.2 태양광 어레이의 회로구성

태양의 위치 변화에 따라 주변 고층 건물 및 나무 등의 음영이 태양광 어레이를 가리게 되면 어레이에 출력손실이 발생한다. 실제로 고층 건물로 인해 특정한 시간대에서 Fig. 2와 같이 부분적으로 음영이 발생하면 해당 시간대에는 고정적인 출력의 손실이 발생한다. 또한, 태양광 스트링에 발생하는 음영의 면적이 증가하게 되면 어레이 전체 출력이 감소하게 된다. 출력의 감소량은 음영의 영향을 받는 태양광 모듈의 개수와 같지만, 일정 개수 이상의 모듈이 음영으로 인해 전압이 감소하면, 해당 스트링 출력전압이 감소하여 인버터의 최소 동작전압범위를 벗어날 가능성이 있다. 즉, 음영의 영향을 받는 모듈의 증가로 인하여 인버터의 최소동작전압범위를 벗어나게 되면 어레이 절반의 모듈이 정상적으로 동작하지만, 인버터가 정지하여 어레이의 전체출력이 0이 되어 출력손실이 발생하게 된다[11-12].

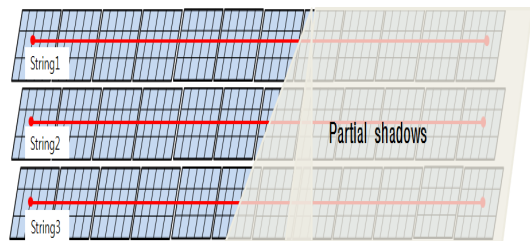


Fig. 2. Partial shadow state of PV array

3. 태양광모듈의 성능향상을 위한 최적구성방안

3.1 태양광모듈의 바이패스 다이오드 구성 알고리즘

태양광모듈은 다수의 태양전지를 직렬로 조합하여 구성되며, 출력은 일사량과 온도에 따라 크게 변화한다. 따라서 식 (1)과 식 (2)의 모듈의 전지 전압(V_{CELL})과 전류(I_m)를 이용하여, 일사량과 온도변화에 따른 태양광모듈의 출력을 구하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{CELL}[V] = V_{m(0)}[1 + \beta(T - T_0)][1 + \delta(T) \ln(\frac{E}{E_0})] \quad (1)$$

$$I_m[A] = \frac{E}{E_0} I_{m(0)}[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

$$P = \sum_{j=1}^n V_{CELL(j)} \times I_m \quad (3)$$

여기서, V_{CELL} : 태양전지의 최대전압, $V_{m(0)}$: 기본조건에서 태양전지의 최대전압, β : 태양전지 전압 온도지수, T_0 : 모듈의 기준온도(25[°C]), T : 모듈의 현재온도, E_0 : 기준일사량(1000[W/m²]), E : 측정일사량, I_m : 태양광모듈의 최대전류, $I_{m(0)}$: 기본조건에서 태양전지 최대전류, α : 태양광모듈 전류 온도지수, P : 최대전력, j : 태양전지의 개수

상기의 식과 같이 환경조건을 고려하여 태양광모듈의 출력을 계산하면 음영에 의해 발생하는 출력손실을 계산할 수 있다. 태양광모듈의 출력손실은 식 (4)와 같이 음영에 영향을 받는 태양전지의 손실과 식 (5)와 같이 바이패스 다이오드가 도통하여 발생하는 손실로 구성된다. 즉, 태양광모듈의 구성을 적당히 변경시키면, 음영에 의해 동작하는 바이패스 다이오드와 태양전지의 구성이 바뀌어 모듈의 출력손실 값을 저감시킬 수 있다.

$$P_{Loss} = I_m \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n V_{CELL(i,j)} \right) \quad (4)$$

$$P_D = I_m \sum_{j=0}^n V_{D(j)} \quad (5)$$

여기서, P_{Loss} : 손실전력, P_D : 바이패스 다이오드 손실 전력, V_D : 바이패스 다이오드 도통전압, i : 동작한 바이패스 다이오드의 수, j : 동작한 바이패스 다이오드와 연결된 태양전지의 수

따라서 태양광모듈의 구성변경에 따른 출력손실 P_{Loss} 의 감소분과 바이패스 다이오드의 소모전력 P_D 를 이용하여, 출력손실의 합 P_{Lo} 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Min } P_{Lo}(x,y) = P_{Loss}(x,y) + P_D(x,y) \quad (6)$$

$$\text{subj. to } N = xy \quad (7)$$

여기서, P_{Lo} : 태양광모듈 전체출력손실, $P_{Loss}(x,y)$: 바이패스 다이오드 개수에 따른 출력손실의 감소분, $P_D(x,y)$: 바이패스 다이오드 동작에 따른 출력손실, x : 직렬연결된 태양전지 수, y : 바이패스 다이오드 수, N : 태양전지 전체 개수

즉, 상기의 목적함수 (6)은 첫 번째 항인 음영에 의한 태양전지의 손실과 두 번째 항인 바이패스 다이오드의 도통손실의 합을 최소로 하는 태양전지 수(x)와 다이오드 수(y)의 조합을 산정하는 것이다. 단, 식 (7)의 제약조건과 같이 바이패스 다이오드 수와 직렬연결된 태양전지의 수의 곱은 항상 일정하다. 여기서, 바이패스 다이오드의 개수 y 가 증가하면 해당 다이오드와 연결되어있는 태양전지의 개수 x 가 줄어들어 음영에 의한 태양전지의 출력손실이 감소하게 된다. 그러나 바이패스 다이오드의 수가 증가할수록 다이오드 도통손실은 증가하게 된다. 따라서, 바이패스 다이오드 개수가 증가하여 감소하는 출력손실의 크기보다 다이오드 동작으로 발생하는 도통손실의 크기가 커지면 모듈의 전체손실은 증가하게 된다. 즉, 태양전지의 출력손실과 바이패스 다이오드의 도통손실의 합을 최소로 하는 태양광모듈의 최적구성을 산정하는 것이 본 알고리즘의 기본 개념이다.

3.2 태양광 어레이의 회로구성 알고리즘

태양광 어레이는 태양의 위치 변화와 주변 고층건물 및 나무 등으로 발생하는 음영에 의해 출력손실이 발생한다. 음영이 없는 정상상태에서, 부분음영이 어레이 전

체 면적의 약 50[%]만 발생하여도, 어레이를 구성하는 스트링 전압의 감소로 인하여 인버터가 동작을 정지하여 전체 출력이 0으로 되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 어레이 회로의 구조변경을 통해 고정적으로 발생하는 음영으로 인한 출력손실을 최소화시키기 위한 알고리즘을 제시한다.

특정 시간대에서 발생하는 음영으로 인한 발전량 손실을 최소화시키기 위한 절차는 다음과 같다.

[Step 1] 태양광 어레이가 설치된 주변 환경(건물, 나무 등) 및 계절에 따라 태양광 어레이에 발생하는 음영의 면적과 음영이 발생하는 시간대를 측정한다.

[Step 2] [Step 1]에서 측정된 데이터를 분석하여, 태양광전원의 출력손실이 크게 발생하는 시간대와 음영이 발생하는 면적을 산정하고, 효율이 가장 높은 회로구성을 제시한다.

[Step 3] [Step 2]에서 산정한 회로구성을 바탕으로 음영이 발생할 경우, 와이어와 스위치를 이용하여 Fig. 3과 같이 회로구성을 변경한다. 어레이의 회로 변경은 음영이 발생한 스트링 중에서 두 개의 스트링 사이에 와이어를 연결하여 음영이 발생되지 않은 부분은 정상적으로 작동하도록 스트링 회로를 구성하였다. 또한, 스위치와 블록킹 다이오드를 연결하여 음영이 발생하지 않은 정상상태의 모듈과 음영이 발생한 모듈을 분리시켰다.

[Step 4] 태양광 인버터의 입력전압을 측정하여 인버터 동작범위를 벗어나게 되면 [Step 3]과 같이 회로구성을 변경한다.

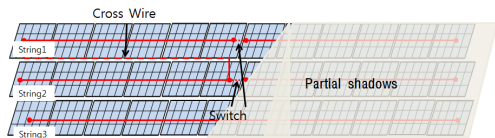


Fig. 3. Wiring connection of PV array

4. PSIM을 이용한 태양광모듈 모델링

4.1 태양광모듈 모델링

바이패스 다이오드와 태양전지의 구성 변경에 따른

모듈의 특성을 분석하기 위하여, 전력소자해석 프로그램인 PSIM을 이용하여 태양광모듈을 모델링하였다. 태양광모듈은 현재 주로 사용되고 있는 250[W]급 다결정 모듈을 대상으로 Fig. 4와 같이 모델링을 수행하였다. 상기 모듈은 기본 구성으로 60개의 태양전지와 3개의 바이패스 다이오드로 구성되어있으며, 태양전지 20개마다 하나의 다이오드가 설치되어 있다.

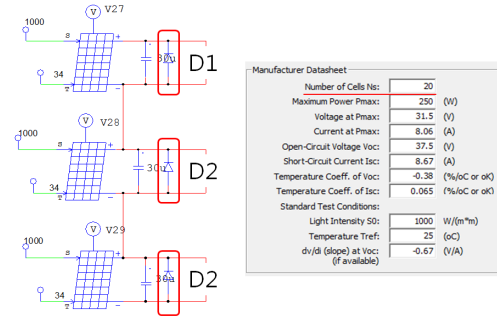


Fig. 4. Modeling of PV module

태양광모듈의 구성변경에 따른 출력특성을 분석하기 위하여, 하나의 바이패스 다이오드에 연결된 태양전지의 조합을 1×60(바이패스 다이오드 개수 × 태양전지 개수), 2×30, 3×20, 4×15, 6×10 등으로 변경시키며(단, 모듈의 전체 전지 개수는 60개임) 모델링을 수행한 결과 Fig. 5와 같다.

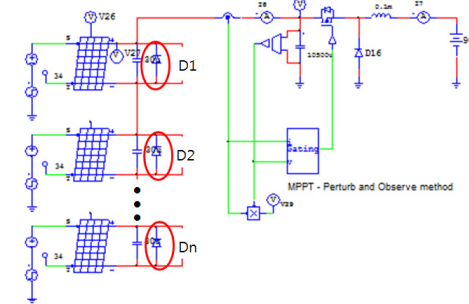


Fig. 5. Modeling of PV module configuration

4.2 태양광 어레이 모델링

250[W]급 태양광모듈 12개를 직렬로 연결하여 3[kW]의 출력을 가지는 스트링으로 구성하고, 3개의 스트링을 병렬로 연결한 태양광 어레이를 모델링하면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

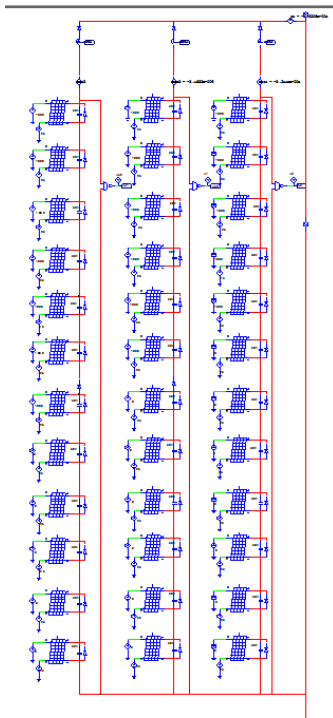


Fig. 6. Equivalent circuit of array A

한편, 태양광 어레이에 발생한 음영으로 인한 출력손실을 최소화하기 위한 방안으로 어레이의 회로구성을 변경하는데, 이 회로에 대한 모델링을 수행하면 Fig. 7과 같다. 여기서, 음영이 발생한 스트링 중에서 두 개의 스트링 사이에 와이어를 연결하여 음영이 발생되지 않은 부분은 정상적으로 작동하도록 스트링 회로를 구성하였다. 또한, 스위치와 블로킹 다이오드를 연결하여 음영이 발생하지 않은 정상상태의 모듈과 음영이 발생한 모듈을 분리시켰다.

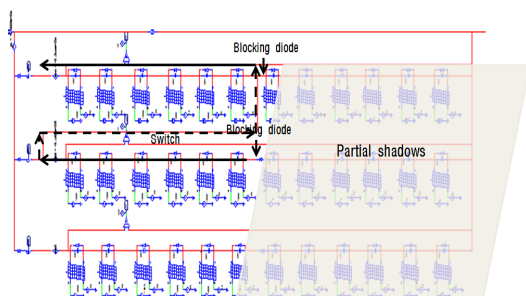


Fig. 7. Equivalent circuit of array configuration

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

5.1 태양광모듈의 성능평가

5.1.1 태양광모듈의 특성분석

4.1절에서 제시한 태양광모듈의 모델링에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여, STC(Standard test condition)조건인 일사량 $1000[\text{W}/\text{m}^2]$ 과 온도 $25[^\circ\text{C}]$ 에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 Table 1과 같이 제조사에서 제시한 태양광모듈의 출력특성과 식 (3)의 값 그리고, 모델링에 의한 시뮬레이션 값이 거의 일치하여, 본 연구에서 제시한 모델링이 유용함을 확인하였다. 한편, 모델링을 이용하여 태양광모듈의 특성커브를 분석하면 Fig. 8과 같이 제조사에서 제시한 값과 유사함을 확인하였다.

Table 1. Comparison results

	initial value of Manufacturers	Eq. (3) results	Simulation results
Pmax	250[W]	250.55[W]	247.56[W]
Vmp	30.8[V]	30.78[V]	30.64[V]
Imp	8.14[A]	8.14[A]	8.07[A]
Voc	37.02[V]	37.5[V]	37.55[V]
Isc	8.67[A]	8.67[A]	8.57[A]

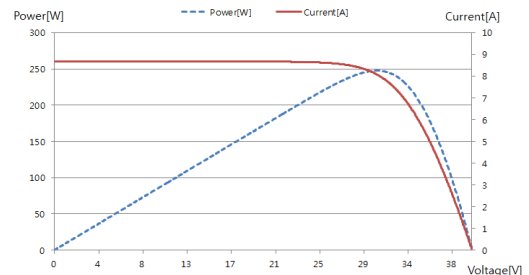


Fig. 8. Output characteristic of PV module

5.1.2 태양광 어레이의 특성분석

4.2절에서 제시한 태양광 어레이의 모델링에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여, STC조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 어레이에 음영이 발생하지 않은 정상상태에서 Fig. 9와 같이 전체출력은 $9[\text{kW}]$, 각 스트링의 출력은 $3[\text{kW}]$ 로 모델링이 정상적으로 수행되었음을 확인하였다.

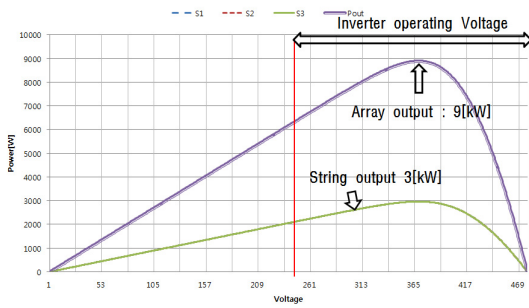
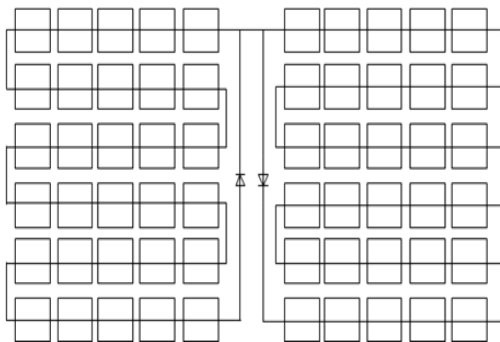


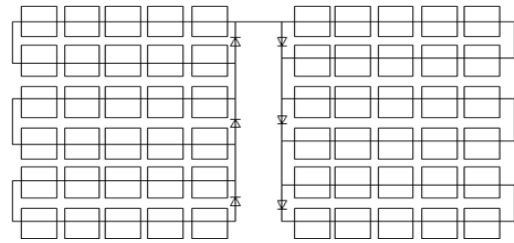
Fig. 9. P-V characteristic at Standard condition

5.2 바이패스 다이오드 구성에 의한 출력특성 분석

3.1절에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, Fig. 10과 같이 태양광모듈의 배열을 2×30, 3×20, 4×15, 6×10 등으로 변경시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 태양광모듈의 이상상태를 분석하기 위하여 음영의 크기를 모듈 면적에 대하여 10[%], 30[%], 60[%] 등으로 변화시키며 출력특성을 비교, 분석하였다. Table 2와 같이, 음영의 면적이 30[%]인 경우 2×30, 6×10 배열에서 출력손실이 크게 감소하였고, 10×6배열 이후에는 바이패스 다이오드의 도통 손실의 증가로 모듈의 출력손실이 다시 증가함을 확인하였다. 또한, 음영의 면적이 60[%]인 경우에는 3×20, 6×10 배열에서 출력손실이 최소가 되었으며, 10×6 배열 이후에는 모듈의 출력손실이 다시 증가함을 확인하였다. 한편, 상기와 같이 알고리즘을 이용하여 계산한 값과 모델링에 의하여 수행한 값을 분석한 결과 거의 일치함을 확인하였다.



(a) 2×30 module configuration



(b) 6×10 module configuration

Fig. 10. Configuration of PV modules

Table 2. Power loss according to shadow

Configuration of PV modules	Area of shadow[%]	Calculation results[W]	Simulation results[W]
1×60	30	245.6	247.6
	60	245.6	247.6
2×30	30	107.2	117.1
	60	245.6	247.6
3×20	30	160.8	158.8
	60	160.8	158.8
4×15	30	182.4	180.2
	60	182.4	180.2
5×12	30	128	137.3
	60	193.6	192.4
6×10	30	105.6	106.5
	60	153.6	153.3
10×6	30	129.6	130.2
	60	158.4	159.2
12×5	30	140.8	143.1
	60	160.8	169.1

5.3 회로구성에 의한 출력특성 분석

Fig. 11과 같이, 본 연구에서 제시한 모델링을 이용하여, 정상상태의 어레이 전체출력을 구하면 9[kW]이지만, 음영이 50[%] 발생한 이상상태의 전체출력은 1[kW]까지 감소함을 확인하였다.(89[%] 감소)

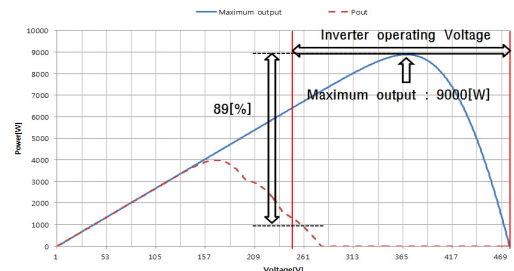


Fig. 11. P-V characteristics by partial shadows

상기와 같은 음영에 따른 출력손실을 줄이기 위하여, 3.2절의 알고리즘을 바탕으로 어레이의 회로구성을 변경하여 출력특성을 개선하였다. 즉, 음영이 발생한 스트

링 중에서 두 개의 스트링 사이에 와이어를 연결하여 음영이 발생되지 않은 부분은 정상적으로 동작할 수 있도록 스트링 회로를 변경하였다. 또한, 이상상태의 모듈을 블록킹 다이오드와 스위치를 통해 정상상태의 모듈과 분리시켜 이상모듈에 따른 출력손실을 최소화 시켰다. 따라서, Fig. 12와 같이 기존의 어레이 회로구성에서 발생한 1[kW]의 출력에서 3[kW]로 향상되어 본 연구에서 제시한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

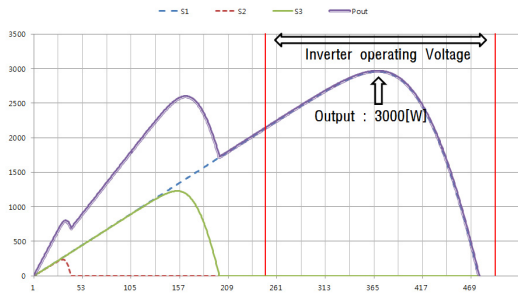


Fig. 12. P-V characteristic by proposed circuit configuration

6. 결 론

본 논문에서는 태양광모듈의 바이패스 다이오드 배열과 태양광 어레이의 회로구성 변경을 통하여 태양광 모듈의 성능향상을 위한 최적구성 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제시한 태양광모듈의 모델링에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여, STC조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제조사에서 제시한 태양광모듈의 출력특성과 모델링에 의한 시뮬레이션 값이 거의 일치함을 확인하였다.
- (2) 바이패스 구성에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과, 음영의 면적이 30[%]인 경우 2×30, 6×10 배열에서 출력손실이 크게 감소하였고, 10×6배열 이후에는 바이패스 다이오드의 도통 손실의 증가로 모듈의 출력손실이 다시 증가함을 확인하였다.
- (3) 음영에 따른 출력손실을 줄이기 위하여, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 바탕으로 어레이의 회로구성을 변경하여 출력특성을 개선하였다. 그 결과 기존의 어레이 회로구성에서 발생한 1[kW]의 출

력에서 3[kW]로 향상되어 본 연구에서 제시한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

References

- [1] A. Molki, "Dust affects solar cell efficiency," *Physics Education*, vol. 45, pp. 456-458, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/45/5/F03>
- [2] A.R. Gxasheka, "Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 611-620.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.005>
- [3] E.D. Dunlop, "Lifetime performance of crystalline silicon PV module," 3rd World conference on photovoltaic energy conversion, pp. 2927-2930, 2003.
- [4] A. Parretta, L. Sarno and R. M. Vicari, "Effects of solar irradiation condition on the outdoor performance of photovoltaic modules", *Optics Communications* 153, 1998, pp.153-163.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018\(98\)00192-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00192-8)
- [5] J. Jie, Y. Hua, H. Wei, P. Gang, L. Jianing and J. Bin, "Modeling of a novel trombe wall with PV cells", *Building and Environment* 42, 2007, pp.1544-1552.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.005>
- [6] Takeshi Igarashi, Teruhisa Kumano, Hitoshi Hayashiya and Toshiaki Takino, "Efficiency Improvement of Rooftop Photovoltaic System at Railway Station", 2015 ICEE
- [7] Siyu Guo, Walsh T.M, Aberle A.G, Peters, M, "Analysing partial shading of PV modules by circuit modeling", *Conference(PVSC)*, 2012 IEEE 38th, On pp. 2957-2960
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318205>
- [8] L. Castaner and S. Silvestre, "Modelling photovoltaic systems using PSpice", John Wiley & Sons, Ltd., 2002, New York
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0470855541>
- [9] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Fuyuki and K. Kurokawa, "Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 75, 2003, pp. 665-671.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00148-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00148-4)
- [10] Xenophontos, A.; Bazzi, A.M. "Analytical modeling of PV maximum power curves under uniform and partial shading conditions", *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014 IEEE 40th, On pp. 1982 - 1986
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/pvsc.2014.6925314>
- [11] N.D. Kaushika, Anil K. Rai, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks", *Energy* 32, 2007, pp. 755-759
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.017>
- [12] A. Mermoud and T. Lejeune, "Partial shading on PV arrays: bypass diode benefits analysis", in *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2010, pp. 4654-4658.

정 종 윤(Jong-Yun Jeong)

[준회원]



- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부(공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기전자통신공학부 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

유 상 원(Sang-Won Ryu)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부(공학사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 동대학원 전기전자통신공학부 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

최 성 식(Sung-Sik Choi)

[준회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사)
- 2014년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

이 인 철(In-Cheol Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 순천향대학교 전기전자공학부 전기공학과(공학사사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

최 흥 열(Hong-Yeol Choi)

[정회원]



- 1998년 2월 : 동아대학교 전기공학과(공학사)
- 2008년 2월 : 충남대학교 전기공학과(공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석