

그림자 영향을 고려한 태양광 패널의 최적 접속 구조

*정우용, *김용중, †김효성
*†공주대학교 전기전자제어공학부

Optimum Connection Structure for PV Panel Considering Shadow Influence

*Woo-Yong Jeong, *Yong-Jung Kim, †Hyosung Kim
*†School of EE and control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

태양광발전에서 PV panel의 출력 전압 및 전류는 제한적이기 때문에, 필요로 하는 전원 조건을 충족시키기 위하여 PV panel을 직병렬로 연결하여 PV array를 구성한다. 이때, PV array에 부분적인 그림자가 발생할 경우 최대발전전력은 PV array의 접속 구조와 블록킹 다이오드 유무에 따라 달라진다. 본 논문에서는 PV panel의 직병렬 접속에 따른 PV array의 6가지의 접속 구조와 블록킹 다이오드 유무를 고려하여, 부분적인 그림자가 발생할 경우 발전전력을 극대화할 수 있는 최적의 접속 구조를 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

태양광발전은 PV cell을 이용하여 태양광에너지를 전기에너지로 변환시킨다. 이때 단일 PV cell은 약 0.6 V의 매우 낮은 출력전압을 갖기 때문에 여러 PV cell을 직렬로 연결하여 PV panel 형태로 사용한다. 그럼에도 단일 PV panel의 출력은 제한적이기 때문에, 시스템에서 요구하는 전기적 특성에 맞추어 PV panel을 직렬 또는 병렬 연결하여 PV array를 구성한다. PV 발전의 출력전압을 증가시키기 위해서는 PV panel을 직렬로 연결하여 PV string을 구성하고, 출력전류를 증가시키기 위해서는 PV string을 병렬로 연결하여 PV array를 구성한다.

PV array를 구성하고 있는 모든 PV panel에 동일한 일사량이 가해진다면, PV array의 출력전압과 출력전류는 각각 PV string에 연결된 직렬 PV panel의 수와 병렬로 연결된 PV string의 수에 비례한다. 하지만 PV array를 구성하고 있는 PV panel에 부분적인 그림자로 인해 서로 다른 일사량이 가해진다면, PV string의 출력전류는 키르히호프의 전류법칙에 의해 일사량이 낮은 PV panel의 전류로 제한되어 출력전력이 감소한다. 또한 여러 PV string이 병렬 연결된 PV array에서는 일사량이 낮은 PV string에 의하여 총합전류가 감소하여 PV array 전체의 출력전력이 감소하는 원인이 된다.

PV string에서 일사량이 낮은 PV panel에 의한 출력전류의 감소를 극복하기 위해서는 PV panel에 병렬로 바이패스 다이오드를 배치한다. 또한 병렬 연결된 PV string에서 일사량이 낮은 PV string이 부하로 동작하는 것을 방지하기 위해 PV string에 직렬로 블록킹 다이오드를 배치한다. 하지만 블록킹 다이오드의 전압강하에 의한 전력손실이 부가적으로 발생하여 발전효율이 저감될 수 있으며, 블록킹 다이오드가 소손될 경우 해당 PV string의 발전자체가 불가능하여 경제적 손실을 야기

할 수 있다.

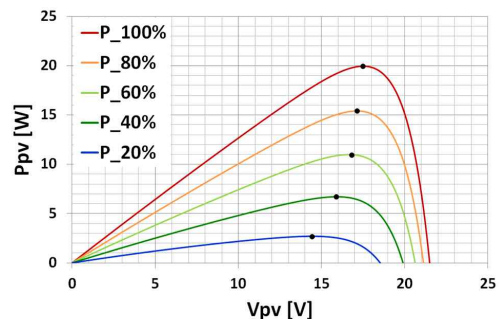
본 논문에서는 PV panel의 접속구조 및 그림자의 영향, 블록킹 다이오드 유무에 따른 PV 발전전력을 분석하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서는 6개의 PV panel을 사용하여 직렬(6S), 병렬(6P), 직병렬(3S×2P, 2S×3P), 그리고 TCT(Total Cross Tied: 3S×2P, 2S×3P) 접속 구조로 총 6가지의 경우를 고려하였다. 이를 통해 그림자가 발생하였을 때 발전 효율을 극대화할 수 있는 최적의 PV panel의 접속 구조를 제시하고 실험을 통해 검증한다.

2. PV 모델링

그림자 조건에서 PV array의 접속 구조에 따른 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 PV panel에 대한 정확한 모델링이 요구된다. 표 1은 시뮬레이션에 적용된 PV panel의 전기적 사양을 나타낸다. 본 논문에서는 저자의 선행 연구에 의한 K-Algorithm을 적용하여 표 1의 PV panel 사양에 따른 PV 모델링을 수행하였다. 그림 1은 일사량 변화에 따른 단일 PV panel의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 1의 P-V 특성곡선에서는 PV panel에 일사량이 감소할수록 Voc, Isc, Vmpp, Impp, Pmpp가 감소한다. 이때, 다수의 PV panel이 연결된 PV array의 경우, 그림자

[표 1] 시뮬레이션에 사용된 PV panel의 전기적 사양

Parameter	Value
Open circuit Voltage(V_{OC})	21.5 [V]
Short circuit Current(I_{SC})	1.31 [A]
MPP Voltage(V_{MPP})	17.5 [V]
MPP Current(I_{MPP})	1.14 [A]
Maximum Power(P_{MPP})	19.95 [W]



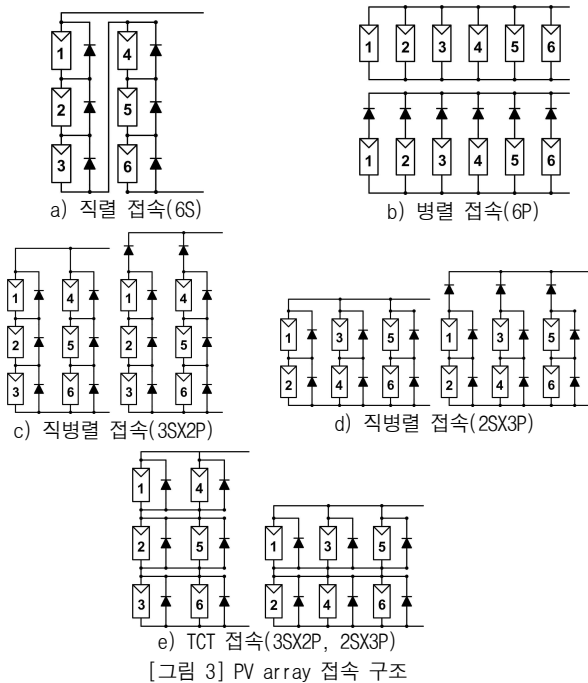
[그림 1] 일사량 변화에 따른 단일 PV panel의 P-V 특성곡선

에 의해 부분적인 일사량 감소 현상이 발생할 수 있다. 이러한 부분적인 그림자의 영향에 따른 PV array의 생산전력은 PV 접속 구조에 영향을 받는다.

3. PV array 접속 구조 및 그림자 조건

그림 3은 부분적인 그림자의 영향에 따른 PV 생산전력을 분석하기 위한 대표적인 6가지 PV array의 접속 구조를 나타낸다. 그림 3a)는 모든 PV panel들을 직렬로 연결한 PV string 구조를 나타내며, PV string의 Voc는 PV panel의 개수에 비례하고 Isc는 단일 PV panel의 Isc와 동일하다. 그림 3b)는 단일 PV panel을 모두 병렬로 연결한 병렬 PV array 접속 구조를 나타내며, 병렬접속 구조의 Voc는 단일 PV panel의 Voc와 동일하고 Isc는 PV 패널의 개수에 비례한다. 그림 3c)는 세 개의 PV panel을 직렬 연결한 PV string을 두 개의 열로 병렬연결한 직병렬 접속 구조이고, 그림 3d)는 두 개의 PV panel을 직렬 연결한 PV string을 세 개의 열로 병렬연결한 직병렬 접속 구조를 나타낸다. 그림 3c)와 그림 3d)에서 직병렬 접속 구조의 Voc는 PV string을 구성하는 PV panel의 개수에 비례하고 Isc는 병렬 연결된 열의 개수에 비례한다. 그림 3e)는 [1]에서 제안한 TCT(Total Cross Tied) 접속 구조를 나타낸다. TCT 접속 구조는 직병렬 PV 접속 구조와 쌍대적인 접속개념으로서, 병렬접속을 우선하여 접속한 후 이들을 직렬로 연결하는 구조이다. TCT 접속 구조의 Voc와 Isc는 직병렬 접속 구조와 동일하다.

이때, PV string의 출력전류가 일사량이 낮은 PV panel에



[표 2] PV 접속 구조에 따른 부분적인 그림자 조건

연결 구조	Shading Case				일사량
	Case1	Case2	Case3	Case4	
(a)	PV6	PV(5+6)	PV(5+6)	PV(4+5+6)	40%
(b)	PV6	PV(5+6)	PV(5+6)	PV(4+5+6)	40%
(c)	PV3	PV(3+6)	PV(3+2)	PV(3+2+6)	40%
(d)	PV6	PV(6+4)	PV(6+5)	PV(6+5+4)	40%
(e)3SX2P	PV3	PV(3+6)	PV(3+2)	PV(3+2+6)	40%
(e)2SX3P	PV6	PV(6+4)	PV(6+5)	PV(6+5+4)	40%

의해 제한되는 것을 방지하기 위해 바이패스 다이오드를 배치한다. 또한 상기 접속구조에서 병렬 접속회로의 전류역입 현상을 저지하기 위하여 설치하는 블로킹 다이오드 유무에 따른 PV array 발전 성능도 함께 고려한다. 표 2는 PV 접속 구조에 따른 부분적인 그림자 조건을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

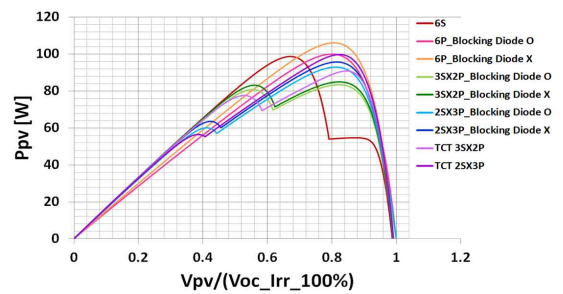
4.1 시뮬레이션 결과

본 절에서는 표 2에서 제시한 PV array 접속 구조와 부분적인 그림자 조건에 따른 발전전력을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 PV array 접속 구조와 부분적인 그림자 조건에 따른 PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림자 영향에 따른 일사량은 접속 구조에 의한 P-V 특성곡선의 차이가 상대적으로 명확하게 나타나는 40%로 설정하였다. 이때, Vpv의 출력범위는 접속 구조에 의해 달라지기 때문에, 그림 4에서 P-V 특성곡선의 수평축은 Vpv를 절대값이 아닌 일사량 100%의 Voc 전압을 기준으로 한 상대적인 Vpv 값으로 표현하였다.

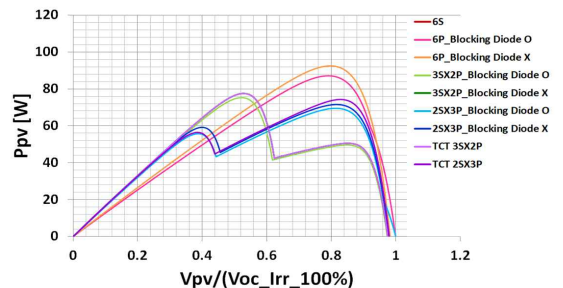
Case 1의 그림자 조건은 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그림 4a)는 Case 1의 그림자 조건에 따른 PV array의 P-V 특성곡선을 나타내며, 접속 구조에 따라 최대발전점의 크기와 P-V 특성곡선의 패턴이 달라짐을 알 수 있다.

Case 2의 그림자 조건은 두 개의 서로 다른 열의 PV string에서 각각 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생하고 Case 3의 그림자 조건은 단일 PV string에서 두 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그림 4b)와 그림 4c)는 Case 2와 Case 3의 그림자 조건에 따른 PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다.

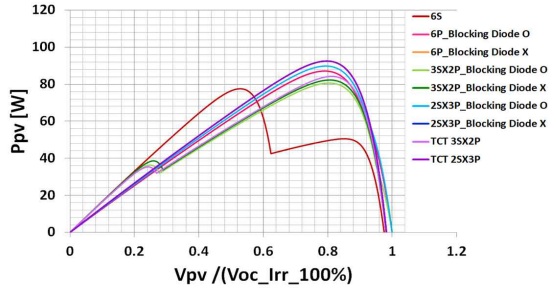
Case 2와 Case 3은 그림자의 영향을 받는 PV panel의 수가 두 대로 동일하지만, 그림 4c)의 접속 구조에 따른 최대발전전력이 그림 4b)의 최대발전전력보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 수의 PV panel에 그림자가 발생하더라도, 같은 PV string의 PV panel에서 그림자가 발생하는 조건이 서로 다른 PV string의 PV panel에서 그림자가 발생하는 조건보다 전력생산에 더 유리한 것을 알 수 있다.



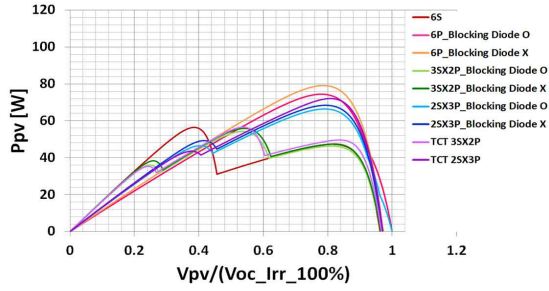
a) Case 1 그림자 조건



b) Case 2 그림자 조건

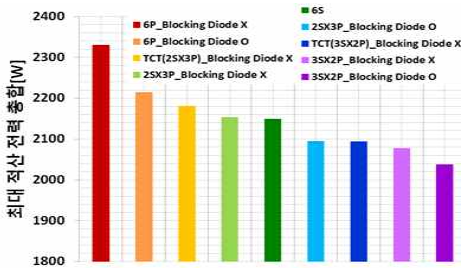


c) Case 3 그림자 조건



d) Case 4 그림자 조건

[그림 4] 그림자 조건(일사량 40%)에 의한 P-V 특성 시뮬레이션 결과



[그림 5] 그림자 조건에 따른 최대발전전력 적산 그래프

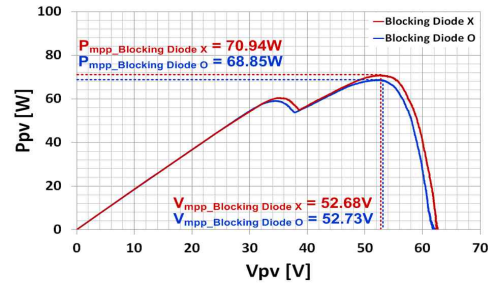
Case 4의 그림자 조건은 세 개의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그림 4d)는 Case 4의 그림자 조건에 따른 PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 이때, Case 1과 Case 2, Case 3의 그림자 조건에 따른 P-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대 전력점이 발생하지만 Case 4의 그림자 조건에 따른 P-V 특성곡선은 세 개의 지역적인 최대 전력점이 발생함을 알 수 있다.

그림 5는 표 2에서 제시한 PV array 접속 구조와 부분적인 그림자 조건에 따른 발전전력을 적산하여 비교한 그래프를 나타낸다. 다양한 그림자 조건에서 가장 전력생산이 많은 PV array 구조는 병렬접속 구조임을 알 수 있다. 하지만 병렬접속 구조의 경우, 발전시스템 전압을 높일 수 없으므로 실제적이지 않다. 일반적인 태양광 발전에서 발전시스템 전압을 높이기 위한 PV array의 접속 구조는 그림 3c)와 같이 PV string을 구성하는 PV panel이 PV array를 구성하는 병렬의 수보다 큰 경우이다.

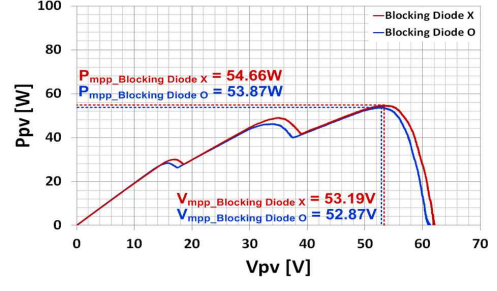
그림 5에서 그림 3c)의 3SX2P 접속 구조에 대하여 그림자 조건에 따른 최대발전전력 적산값은 블록킹 다이오드를 적용하는 경우보다 블록킹 다이오드를 적용하지 않은 경우의 발전전력이 높음을 알 수 있다. 이는 PV panel이 부하로 동작함에 따라 발생하는 손실보다 블록킹 다이오드에 의한 전력 손실이 더 심각함을 의미한다.

4.2 실험 결과

그림 6은 3SX2P 접속 구조에서 그림자 조건에 따른 실험용



a) Case 1 그림자 조건



b) Case 4 그림자 조건

[그림 6] 3SX2P 접속 구조에서 그림자 조건에 따른 특성 실험결과

PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 6a)는 두 개의 지역적인 최대전력점이 발생하는 Case 1의 그림자 조건에 따른 실험용 PV array의 P-V 특성곡선을 나타내고 그림 6b)는 세 개의 지역적인 최대전력점이 발생하는 Case 4의 그림자 조건에 따른 실험용 PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 6a)와 그림 6b)는 시뮬레이션 결과와 동일하게, 블록킹 다이오드를 적용한 경우보다 블록킹 다이오드를 적용하지 않은 경우의 최대전력점이 더 높음을 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 6개 PV panel을 사용하여 구성되는 PV array의 6가지 접속 구조와 블록킹 다이오드 유무에 따른, 부분적인 그림자 조건에 대한 PV array의 발전전력을 분석하였다. 전반적으로 블록킹 다이오드를 사용하지 않는 것이 유리함을 보였으며 그 중에서도 병렬접속이 가장 우수했다. 병렬우선 직병렬접속(2SX3P)는 직렬우선 직병렬접속(3SX2P)보다는 좋았으며 순수한 직렬접속 방식은 두 접속구조의 중간정도의 특성을 보였다. 또한 직병렬접속 시 병렬 PV panel 들을 함께 묶는 TCT(total cross tied) 접속 방식이 효과가 있음을 알게 되었다. 실제 날씨 조건에서 블록킹 다이오드를 적용하지 않으므로써, PV string에 블록킹 다이오드를 설치하기 위한 비용과 블록킹 다이오드의 고장으로 인해 발생하는 발전 손실에 따른 경제적 손실을 줄일 수 있음을 증명하였다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2016R1D1A3B01008279)

참고 문헌

- [1] B Veerasamy, T Takeshita, A Jote, T Mekonnen "Mismatch Loss Analysis of PV array Configurations Under Shading Conditions", in Proc. 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, Oct. 2018.