

그림자 조건에서 태양광 패널의 접속구조에 따른 발전량 분석

정우용¹, 김용중¹, 김효성[†]

Analysis on Generation Power according to Connection Structure for PV Panel under Shadow Condition

Woo-Yong Jeong¹, Yong-Jung Kim¹, and Hyosung Kim[†]

Abstract

Considering that the output voltage and current of a single PV panel are limited in PV power generation, a PV array should be constructed by connecting several PV panels in series and parallel to meet the required voltage/power levels for power generation capacity. When a PV array is partially shaded, the maximum power generation depends on the configuration of a PV array and the presence or absence of blocking diodes. This study considers six PV array configurations and the presence or absence of blocking diodes. An optimum connection structure was proposed to maximize power generation in a partial shadow condition. Results were verified through simulation and an experiment.

Key words: PV connection structure, Partial shading, Blocking diodes

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 직병렬로 연결하여 PV panel 형태로 사용한다. 그럼에도 단일 PV panel의 출력전력 용량은 제한적이기 때문에, 시스템에서 요구하는 발전전력 용량에 맞추기 위하여 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 병

렬로 연결된 PV string의 수에 비례한다. 하지만 PV string을 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^[1]. 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^[2]. 하지만 블록킹 다이오드의 전압강하에 의한 전력손실은 발전 효율을 낮추며, 블록킹 다이오드가 소손될 경우 해당 PV string의 발전 자체가 불가능하여 경제적 손실을 야기할 수 있다^[3].

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) 접속구조로 총 6가지의 경우를 고려하였다. 이를 통해 그림자가 발생하였을 때 발전 효율을

Paper number: TKPE-2020-25-2-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Oct. 4, 2019; revised Oct. 14, 2019; accepted Dec. 23, 2019

— 본 논문은 2019년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

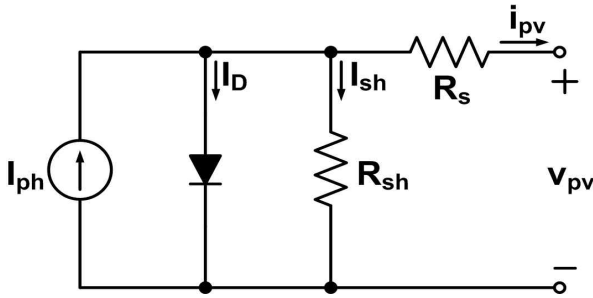


Fig. 1. PV equivalent circuit.

TABLE I
UNKNOWN CONSTANTS OF PV OUTPUT
CURRENT EQUATION

Unkwon Constant	Definition
Rs	Shunt resistance
Rsh	Series resistnace
Vt	Diode thermal currnet
I0	Diode saturation current
ns	The number of PV cell
Iph	Current by Irradiation

TABLE II
ELECTRICAL SPECIFICATIONS OF THE PV PANEL

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]

극대화할 수 있는 최적의 PV panel의 접속구조를 제시하고 실험을 통해 검증한다.

2. PV 모델링

그림자 조건에서 PV array의 접속구조에 따른 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 PV panel에 대한 정확한 모델링이 요구된다. 그림 1은 단일 다이오드로 등가화한 PV panel의 전기적 모델이다. 그림 1에서 I_{ph}는 일사량에 따라 PV cell에서 발생된 전류이고 I_D는 PV cell의 기생 다이오드로 흐르는 가지(branch) 전류, I_{sh}는 PV cell의 자체손실을 고려한 병렬 저항 성분 R_{sh}(parallel shunt resistance)로 흐르는 가지(branch) 전류이다. R_s는 PV cell의 도선에 의한 손실을 고려한 직렬 저항 성분이다. PV cell의 출력전류 i_{pv}는 일사량에 따라 발생한 전류와 가지 전류들의 차와 같고 PV cell의 출력전류 방정식은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 I₀는 기생 다이오드의 saturation 전류이고 V_t는 다이오드 온도에 의해 발생

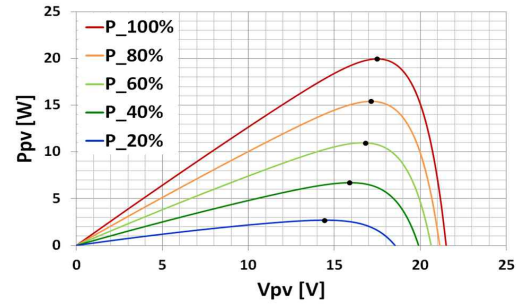


Fig. 2. P-V characteristic curve of single PV panel by irradiation level.

하는 열전압, ns는 PV cell의 개수이다. 표 1은 PV 등가 회로와 PV 출력전류 방정식의 미지상수를 나타내며, PV의 출력특성을 파악하기 위해 미지상수 값이 반드시 요구된다. 이러한 PV의 미지상수들을 구하기 위해 저자의 선행 연구에 의한 K-Algorithm을 적용하여 표 2의 PV panel 사양에 따른 PV 모델링을 수행하였다.

$$i_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

그림 2는 시뮬레이션에서 일사량 변화에 따른 PV panel의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 2의 P-V 특성 곡선에서는 PV panel에 일사량이 100% 에서 20% 까지 감소할 경우, Voc와 Isc, Vmpp, Impp, Pmpp가 감소하는 것을 보여준다.

3. PV array 접속구조 및 그림자 조건

PV panel의 출력전압과 출력전력의 크기는 제한적이기 때문에, 태양광발전 시스템에서 요구되는 출력전압과 출력전력의 레벨을 맞추기 위해서는 PV panel을 여러 개 사용하여 직렬 및 병렬 접속함으로써 PV array를 구성한다. 구성된 PV array에 구름 또는 건축물에 의한 부분적인 그림자 현상이 발생할 경우 PV array의 출력은 감소한다. 이러한 부분적인 그림자의 영향에 따른 PV array의 생산전력은 PV 접속구조에 의해 영향을 받는다.

그림 3은 부분적인 그림자의 영향에 따른 PV 생산전력을 분석하기 위한 대표적인 6가지 PV array의 접속구조를 나타낸다. 그림 3(a)는 모든 PV panel들을 직렬로 연결한 PV string 구조를 나타내며, PV string의 Voc는 PV panel의 개수에 비례하고 Isc는 단일 PV panel의 Isc와 동일하다. 그림 3(b)는 단일 PV panel을 모두 병렬로 연결한 병렬 PV array 접속구조를 나타내며, 병렬 접속구조의 Voc는 단일 PV panel의 Voc와 동일하고 Isc는 PV 패널의 개수에 비례한다. 그림 3(c)는 세 개의 PV panel을 직렬 연결한 PV string을 두 개의 열로 병렬연결한 직병렬 접속구조이고, 그림 3(d)는 두 개의 PV

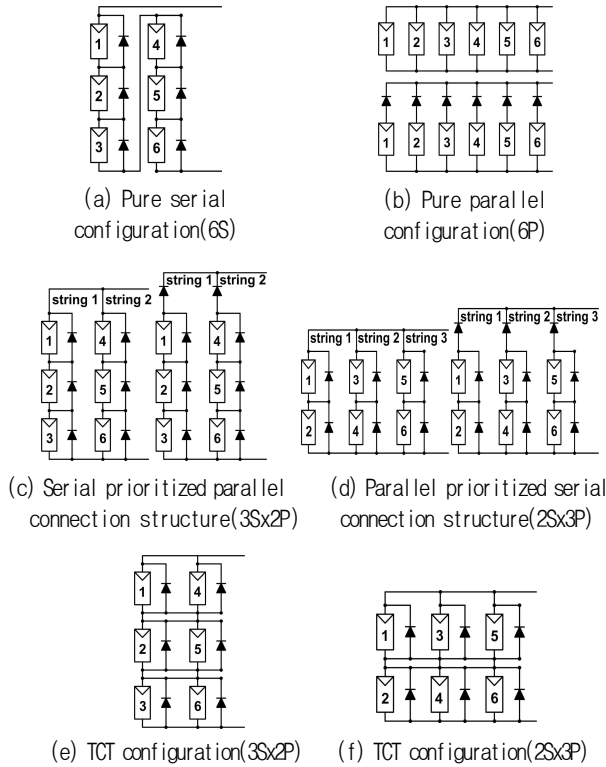


Fig. 3. PV array configuration.

TABLE III
PARTIAL SHADOW CONDITION ACCORDING TO PV
ARRAY CONFIGURATION

Connection Structure	Shading Case				Solar radiation
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
(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)	PV3	PV(3+6)	PV(3+2)	PV(3+2+6)	40%
(f)	PV6	PV(6+4)	PV(6+5)	PV(6+5+4)	40%

panel을 직렬 연결한 PV string을 세 개의 열로 병렬 연결한 직병렬 접속구조를 나타낸다. 그림 3(c)와 그림 3(d)에서 직병렬 접속구조의 V_{oc} 는 PV string을 구성하는 PV panel의 개수에 비례하고 I_{sc} 는 병렬 연결된 열의 개수에 비례한다. 그림 3(e)는 [4]에서 제안한 TCT(Total Cross Tied) 접속구조를 나타낸다. TCT 접속구조는 직병렬 PV 접속구조와 쌍대적인 접속개념으로서, 병렬접속을 우선하여 접속한 후 이들을 직렬로 연결하는 구조이다. TCT 접속 구조의 V_{oc} 와 I_{sc} 는 직병렬 접속 구조와 동일하다.

이때, PV string의 출력전류가 일사량이 낮은 PV panel에 의해 제한되는 것을 방지하기 위해 바이패스 다이오드를 배치한다. 또한 상기 접속 구조에서 병렬 접속

회로의 전류역입 현상을 저지하기 위하여 설치하는 블록킹 다이오드 유무에 따른 PV array 발전 성능도 함께 고려한다. 표 3은 PV 접속 구조에 따른 부분적인 그림자 조건을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션 결과

본 절에서는 그림 3에서 제시한 PV array 접속 구조와 표 3의 부분적인 그림자 조건에 따른 발전전력을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림자가 발생하는 PV panel에 가해지는 일사량의 비율은 PV 접속 구조에 의한 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선의 차이가 상대적으로 명확하게 나타나는 40%로 설정하였다.

그림 4와 그림 5는 다양한 PV array 접속 구조와 블록킹 다이오드 유무, 그림자 조건에 따른 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 4와 그림 5에서 블록킹 다이오드 유무에 따른 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선은 두 가지 선 종류로 분류하였다: 실선(블록킹 다이오드가 없는 경우), 점선(블록킹 다이오드가 있는 경우). 또한 그림자 조건은 다섯 가지를 고려하였다: 그림자가 없는 경우, 그림자가 있는 경우(case 1, case 2, case 3, case 4). 그림 4와 그림 5에서 각 조건의 최대전력점은 PV array 접속 구조가 동일하더라도 그림자 조건과 블록킹 다이오드 유무에 따라 다양한 패턴을 갖는다. 그림 4와 그림 5에서 블록킹 다이오드가 없는 조건과 다섯 가지 그림자 조건에 따른 최대전력점은 다섯 가지 표식(marker)으로 나타내었다: 그림자가 없는 경우(●), case 1(■), case 2(▲), case 3(●), case 4(+). 또한 블록킹 다이오드가 있는 조건과 다섯 가지 그림자 조건에 따른 최대전력점도 다섯 가지 표식(marker)으로 나타내었다: 그림자가 없는 경우(○), case 1(□), case 2(△), case 3(◇), case 4(⊕). 이때 I-V 특성곡선 및 P-V 특성곡선에서 하나의 최대전력점이 발생할 경우, 이 점을 MPP(Maximum power point)라고 정의하였고 두 개 이상의 최대전력점이 발생할 경우, 이 점들을 LMPP(Local maximum power point)라고 정의하였다.

그림 4(a)는 단순직렬 접속 구조에서 그림자 조건에 따른 I-V 특성곡선을 나타낸다. 단순직렬 접속 구조는 여섯 개의 PV panel을 모두 직렬로 연결한 구조이다. 그러므로 그림자가 없는 경우 단순직렬 접속 구조의 V_{oc} 는 단일 PV panel의 V_{oc} 값에 여섯 배로 증가하며, I_{sc} 는 단일 PV panel의 I_{sc} 와 동일하고 한 개의 최대전력점(MPP)을 갖는다. 단순직렬 접속 구조에서 그림자 조건은 세 가지 경우이다: case 1(하나의 PV panel에 그림자 발생), case 2 및 case 3(두 개의 PV panel에 그림자 발생), case 4(세 개의 PV panel에 그림자 발생). 그림 4(a)에서 그림자가 발생하는 PV panel의 개수에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점

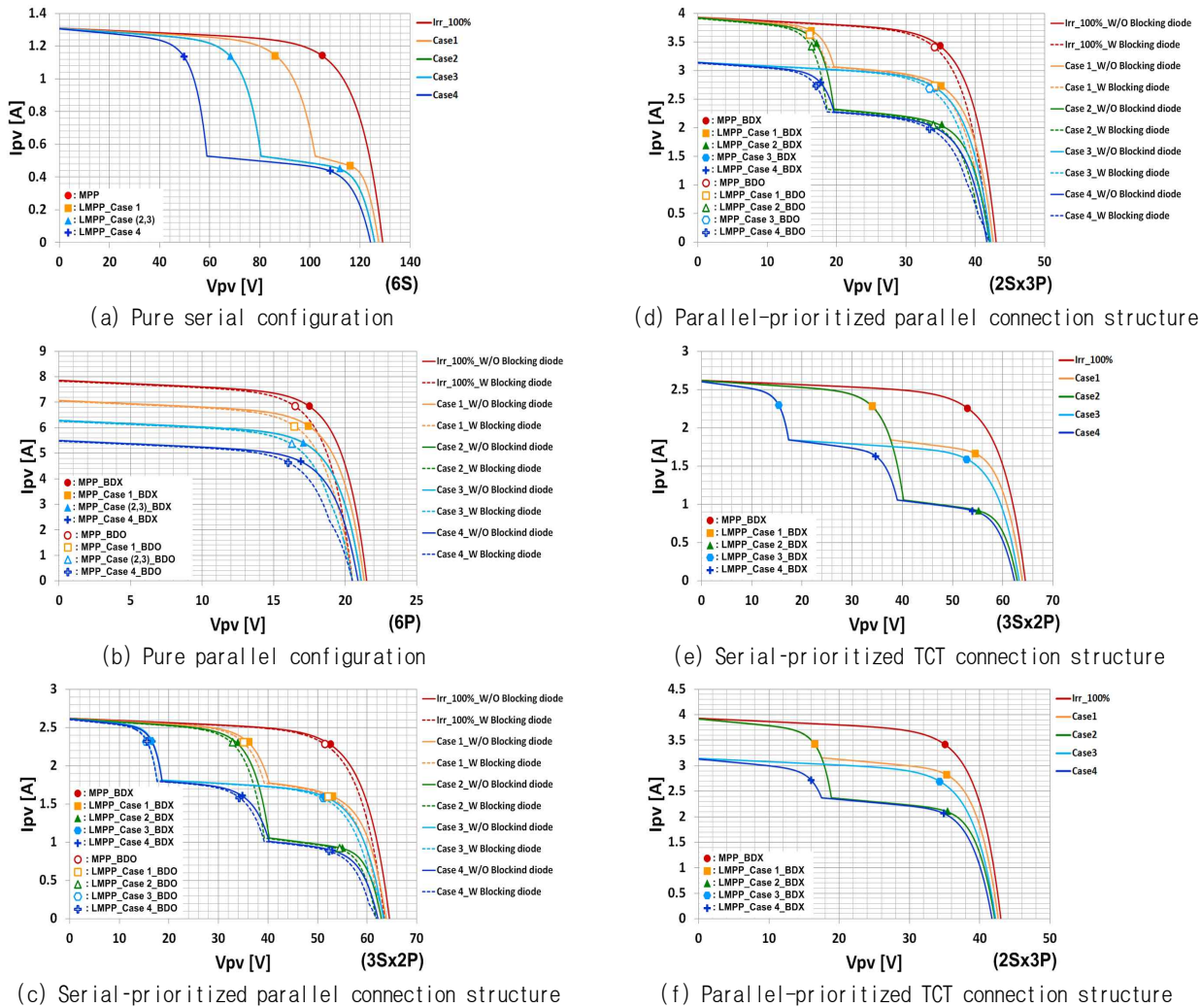


Fig. 4. I-V characteristic curve by PV array configuration.

(LMPP)이 발생한다. 두 개의 LMPP 중 하나는 MPP를 기준으로 V_{oc} 부근에 위치하며 다른 하나는 I_{sc} 부근에 위치한다. V_{oc} 부근의 LMPP점의 경우 그림자가 발생한 PV panel과 정상적인 PV panel의 출력이 모두 출력에 기여하기 때문에, 그림자 조건의 변화에도 해당 LMPP의 변동이 크지 않다. 반면 I_{sc} 부근의 LMPP의 경우 정상적인 PV panel만이 출력에 기여하기 때문에, 그림자 조건에 따라 해당 LMPP의 V_{mpp} 가 크게 변화한다.

그림 4(b)는 단순병렬 접속 구조에서 그림자 조건과 블록킹 다이오드 유무에 따른 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 단순병렬 접속 구조는 여섯 개의 PV panel이 병렬로 연결한 구조이다. 그러므로 그림자가 없는 경우 단순병렬 접속 구조의 V_{oc} 는 단일 PV panel의 V_{oc} 와 동일하며, I_{sc} 는 단일 PV panel의 I_{sc} 값의 여섯 배로 증가하고 한개의 최대전력점(MPP)을 갖는다. 단순병렬 접속 구조에서 그림자 조건은 세 가지 경우이다: case 1(하나의 PV panel에 그림자 발생), case 2 및 case 3(두 개의 PV panel에 그림자 발생), case 4(세 개의 PV panel에 그림자 발생). 단순직렬 접속 구조와 다르게 단순병렬

접속 구조는 부분적인 그림자가 발생하더라도 오직 한개의 최대전력점(MPP)이 발생한다. 단순병렬 접속 구조에서 부분적인 그림자가 발생할 경우 그림자가 발생한 PV panel과 정상적인 PV panel이 모두 출력에 기여한다. 이때 그림자가 발생한 PV panel의 출력이 감소하기 때문에 그림자 조건에 따라 MPP의 I_{mpp} 가 크게 변화한다. 블록킹 다이오드 유무에 따른 단순병렬 접속 구조의 출력을 비교한 결과, 전체적으로 블록킹 다이오드가 설치되지 않은 접속 구조의 V_{mpp} 와 I_{mpp} 가 설치된 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 4(c)는 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조에서 그림자 조건과 블록킹 다이오드 유무에 따른 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 직렬우선직병렬 접속(3Sx2P) 구조는 세 개의 PV panel이 직렬로 연결된 PV string을 두 개의 열로 조합한 구조이다. 각 PV string을 구분하기 위해 서로다른 두 개의 PV string을 string 1, string 2로 정의하였다. 그림자가 없는 경우 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조의 V_{oc} 는 단일 PV panel의 V_{oc} 값의 세 배로 증가하며, I_{sc} 는 단일 PV panel의 I_{sc} 값의 두 배로

증가하고 한 개의 최대전력점(MPP)을 갖는다. 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조에서 그림자 조건은 네 가지 경우를 고려하였다: case 1, case 2, case 3, case 4. 그림자 조건에 따른 직렬우선 직병렬 접속 구조의 출력은 string 1의 출력과 string 2의 출력의 합으로 결정된다.

Case 1의 그림자 조건인 경우, string 1에서 하나의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 1의 출력은 부분적인 그림자가 발생한 단순 직렬 접속 구조의 I-V 특성곡선 패턴을 따르고 string 2의 출력은 정상적인 I-V 특성곡선 패턴을 따른다. case 1에서 string 1과 string 2의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 모든 PV panel이 출력에 기여하고, Isc 부근의 LMPP의 경우 string 1과 string 2의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다.

Case 2의 그림자 조건인 경우, string 1과 string 2에서 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 1과 string 2의 출력은 모두 부분적인 그림자가 발생한 직렬 접속 구조의 출력 패턴을 따른다. string 1과 string 2의 그림자가 발생하는 PV panel 수가 동일하기 때문에 string 1과 string 2의 출력은 동일하다. case 2에서 string 1과 string 2의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 모든 PV panel이 출력에 기여하고 Isc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다.

Case 3의 그림자 조건인 경우, string 1에서 두 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 1의 출력은 부분적인 그림자가 발생한 직렬 접속 구조의 I-V 특성곡선 패턴을 따르고 string 2의 출력은 정상적인 I-V 특성곡선 패턴을 따른다. case 3에서 string 1과 string 2의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 모든 PV panel이 출력에 기여하고, Isc 부근의 LMPP의 경우 string 1과 string 2의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다. case 3의 그림자가 발생한 PV panel의 개수가 case 1보다 많기 때문에, case 3의 Isc 부근의 Vmpp가 case 1보다 작은 것을 확인할 수 있다.

Case 4의 그림자 조건인 경우, string 1에서 두 대의 PV panel과 string 2에서 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 1과 string 2의 출력은 모두 부분적인 그림자가 발생한 단순 직렬접속 구조의 출력 패턴을 따른다. string 1과 string 2의 그림자가 발생하는 PV panel 수가 다르기 때문에 string 1과 string 2의 출력은 다르다. case 4에서 string 1과 string 2의 합에 따른 I-V 특성곡선은 세 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 세 개의 LMPP 중에서

Voc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 모든 PV panel이 출력에 기여하고, Isc 부근의 LMPP 경우 string 1과 string 2의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다. 중간 지점에 있는 LMPP의 경우 string 1의 모든 PV 패널과 string 2의 정상적인 PV panel이 출력에 기여한다. 블록킹 다이오드 유무에 따른 직렬우선 직병렬 (3Sx2P) 접속 구조의 출력을 비교한 결과, 전체적으로 블록킹 다이오드가 설치되지 않은 접속 구조의 Vmpp와 Impp가 설치된 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 4(d)는 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조에서 그림자 조건과 블록킹 다이오드 유무에 따른 I-V 특성곡선을 나타낸다. 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조는 두 개의 PV panel이 직렬로 연결된 PV string을 세 개의 열로 조합한 구조이다. 각 PV string을 구분하기 위해 서로 다른 세 개의 PV string을 string 1과 string 2, string 3로 정의하였다. 그림자가 없는 경우 직병렬 접속 구조의 Voc는 단일 PV panel의 Voc의 두 배로 증가하며, Isc는 단일 PV panel의 Isc의 세 배로 증가하고 한 개의 최대전력점(MPP)을 갖는다. 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조에서 그림자 조건은 두 가지 경우를 고려하였다: case 1, Case 2. 그림자 조건에 따른 직병렬 접속 구조의 출력은 string 1의 출력과 string 2의 출력 그리고 string 3의 출력의 합으로 결정된다.

Case 1의 그림자 조건인 경우, string 3에서 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 3의 출력은 부분적인 그림자가 발생한 직렬 접속 구조의 I-V 특성곡선 패턴을 따르고 string 1과 string 2의 출력은 정상적인 I-V 특성곡선 패턴을 따른다. case 1에서 string 1과 string 2, string 3의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1부터 string 3의 모든 PV panel이 출력에 기여하고, Isc 부근의 LMPP의 경우 string 1부터 string 3의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다.

Case 2의 그림자 조건인 경우, string 2과 string 3에서 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 2과 string 3의 출력은 모두 부분적인 그림자가 발생한 직렬 접속 구조의 출력 패턴을 따르고 string 1의 출력은 정상적인 I-V 특성곡선 패턴을 따른다. case 2에서 string 1과 string 2, string 3의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1부터 string 3의 모든 PV panel이 출력에 기여하고 Isc 부근의 LMPP 경우 string 1부터 string 3의 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다.

Case 3의 그림자 조건인 경우, string 3에서 두 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. string 3의 PV panel에 모두 그림자가 발생함으로, 직병렬 접속

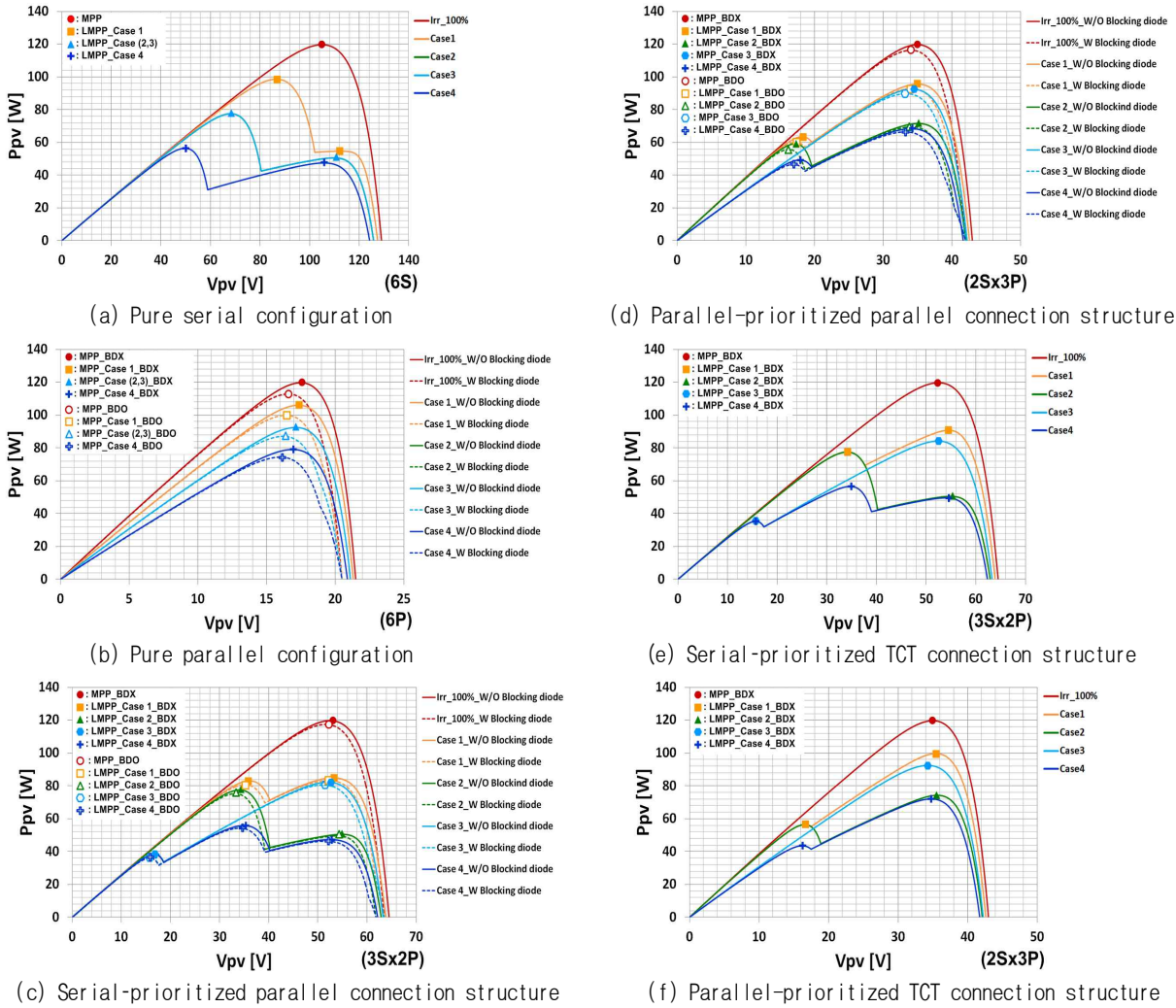


Fig. 5. P-V characteristic curve by PV array configuration.

(2Sx3P) 구조의 전체 출력은 부분적인 그림자가 발생한 병렬 연결 구조의 출력 패턴을 따른다. case 3에서 string 1과 string 2, string3의 합에 따른 I-V 특성곡선은 하나의 최대전력점(MPP)을 갖는다. 이때 MPP에서 string 1부터 string 3의 모든 PV panel이 출력에 기여한다.

Case 4의 그림자 조건인 경우, string 3에서 두 대의 PV panel과 string 2에서 한 대의 PV panel에 부분적인 그림자가 발생한다. 그러므로 string 2는 부분적인 그림자가 발생하는 직렬 접속 구조의 출력 패턴을 따르며, string 3는 부분적인 그림자가 발생하는 단순 병렬접속 구조의 출력 패턴을 따르고 string 1은 정상적인 I-V 특성곡선 패턴을 따른다. case 4에서 string 1과 string 2, string 3의 합에 따른 I-V 특성곡선은 두 개의 지역적인 최대전력점(LMPP)을 갖는다. 이때 Voc 부근의 LMPP 경우 string 1부터 string 3의 모든 PV panel이 출력에 기여하고, Isc 부근의 LMMP 경우 string 1과 string 2에 정상적인 PV panel만이 출력에 기여한다. 블록킹 다이오드 유무에 따른 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조의

출력을 비교한 결과, 전체적으로 블록킹 다이오드가 설치되지 않은 접속 구조의 V_{mpp} 와 I_{mpp} 가 설치된 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 4(e)와 그림 4(f)는 직렬우선 TCT 접속(3Sx2P) 구조와 병렬우선 TCT 접속(2Sx3P) 구조에서 그림자 조건에 따른 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 그림자가 없는 경우, 전체적인 TCT 접속 구조의 V_{oc} 와 I_{sc} 는 직병렬 접속 구조와 동일하다. 부분적인 그림자 조건이 발생한 경우, TCT 접속 구조의 I-V 특성곡선은 직병렬 접속과 유사한 패턴을 갖는다. 직렬우선 TCT 접속(3Sx2P) 구조일 경우 그림자 조건 case 1과 case 2에 따른 I_{mpp} 와 V_{mpp} 가 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조보다 높다. 병렬우선 TCT 접속(2Sx3P) 구조일 경우 그림자 조건 case 1과 case 2에 따른 I_{mpp} 와 V_{mpp} 가 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조보다 높다.

그림 5(a)는 단순 직렬접속에서 그림자 조건에 따른 P-V 특성곡선을 나타낸다. 이때 PV panel에 그림자가 주어진 경우, 그림 4(a)의 I-V 특성곡선처럼 두 개의 LMPP가 나타난다. 그림자가 주어진 PV panel의 개수가

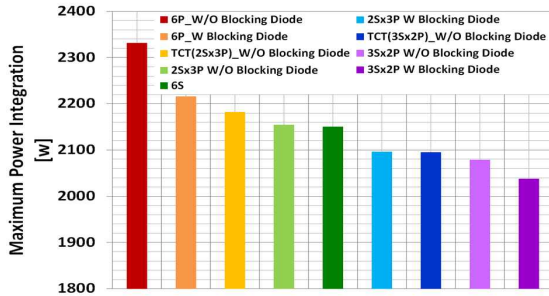


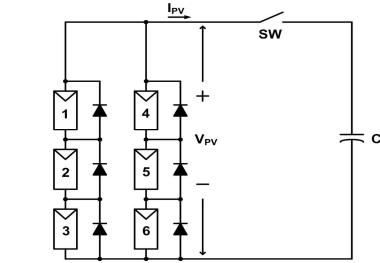
Fig. 6. Maximum generating power integration graph by shadow condition.

증가함에 따라 LMPP의 P_{mpp}가 감소한다.

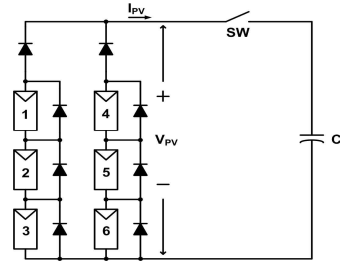
그림 5(b)는 단순 병렬접속에서 그림자 조건에 따른 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 4(b)의 I-V 특성곡선처럼 한 개의 MPP가 발생한다. 단순 직렬접속과 마찬가지로 그림자가 주어진 PV panel의 개수가 증가함에 따라 MPP의 P_{mpp}가 감소한다. 블록킹 다이오드 유무에 따른 단순병렬 접속 구조의 출력을 비교한 결과, 전체적으로 블록킹 다이오드가 설치되지 않은 접속 구조의 P_{mpp}가 설치된 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 5(c)와 그림 5(d)는 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조와 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조에서 그림자 조건과 블록킹 다이오드 유무에 따른 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 5(c) 및 그림 5(d) P-V 특성곡선에서 그림자 조건 및 블록킹 다이오드의 유무에 따른 특성은 그림 4(c) 및 그림 4(d)의 I-V 특성곡선의 특성이 반영되어 나타난다. 그림 5(d)의 case 3의 경우를 제외하고 그림자가 주어진 PV panel의 개수가 증가함에 따라, LMPP의 개수는 증가하고 LMPP의 P_{mpp}는 감소한다. 특히, case 2와 case 3은 그림자의 영향을 받는 PV panel의 수가 두 대로 동일하지만, case 3의 접속 구조에 따른 최대발전 전력이 case 2의 최대발전전력보다 큰 것을 확인할 수 있다. 블록킹 다이오드 유무에 따른 직렬우선 직병렬(3Sx2P)접속 구조의 출력을 비교한 결과, 전체적으로 블록킹 다이오드가 설치되지 않은 접속 구조의 P_{mpp}가 설치된 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 5(e)와 그림 5(f)는 직렬우선 TCT 접속(3Sx2P) 구조와 병렬우선 TCT 접속(2Sx3P) 구조에서 그림자 조건에 따른 P-V 특성 곡선을 나타낸다. 그림 5(e) 및 그림 5(f) P-V 특성곡선에서 그림자 조건에 따른 특성은 그림 4(e) 및 그림 4(f)의 I-V 특성곡선의 특성이 반영되어 나타난다. TCT 접속 구조의 P-V 특성곡선도 직병렬 접속과 유사한 패턴을 갖는다. 직렬우선 TCT 접속(3Sx2P) 구조일 경우 그림자 조건 case 1과 case 2에 따른 P_{mpp}가 직렬우선 직병렬 접속(3Sx2P) 구조보다 높다. 병렬우선 TCT 접속(2Sx3P) 구조일 경우 그림자 조건 case 1과 case 2에 따른 P_{mpp}가 병렬우선 직병렬 접속(2Sx3P) 구조보다 높다.



(a) Connection without blocking diodes



(b) Connection with blocking diodes

Fig. 7. Experimental circuit for PV generation (3Sx2P Connection Structure).

그림 6는 표 3에서 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 3(c)와 같이 PV string을 구성하는 PV panel이 PV array를 구성하는 병렬의 수보다 큰 경우이다.

그림 6에서 그림 3(c)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.

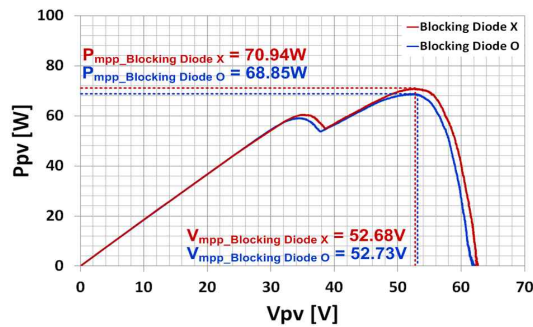
4.2 실험 결과

본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에서 PV array 구조는 실제 PV 발전 환경과 유사한 직병렬 접속(3Sx2P) 구조이며, 시뮬레이션 회로와 동일하게 각 PV panel에 병렬로 바이패스 다이오드를 설치하였다.

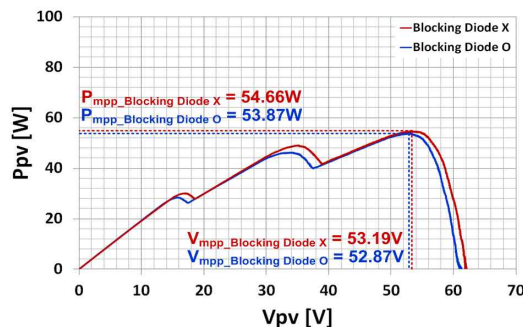
그림 7은 PV 발전 실험 개념도를 나타낸다. 그림 7에서 동일한 일사량 조건에서 블록킹 다이오드 유무에 따른 발전전력을 비교하기 위해, 두 개의 직병렬 접속(3Sx2P) 구조 세트를 구성하였다. 그림 7(a)는 블록킹 다이오드가 없는 접속 구조이며, 그림 7(b)는 블록킹 다이오드가 있는 접속 구조이다.



Fig. 8. Experimental environment for PV generation (3Sx2P Connection Structure).



(a) Shadow condition case 1



(b) Shadow condition case 4

Fig. 9. Experimental P-V characteristic curve by partial shadow conditions in serial prioritized 3Sx2P connection structure.

그림 8은 PV 발전 실험 환경을 나타낸다. 실험당시 모듈의 표면 온도는 약 22.6°C이며, 일사량은 약 71%이다. 실험에서 사용된 블록킹 다이오드의 제품명은 “10A10”이며 허용 전류는 10A, 최대 전압은 100V이다. 표 2의 PV panel의 사양을 고려하였을 경우 직병렬 접속(3Sx2P) 구조의 I_{SC} 는 2.62A이며 V_{OC} 는 64.5V이므로 해당 다이오드가 실험에 적합하다고 판단이 되었다. 두 대의 직병렬 접속(3Sx2P) 구조에서 단일 PV panel의 부분적인 그림자 조건을 조정해 주기 위해 일사량의 60%를 가릴 수 있는 솔라필름이 사용되었다.

그림 9는 직병렬 접속(3Sx2P) 구조에서 그림자 조건에 따른 실험용 PV array의 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 9(a)는 두 개의 지역적인 최대전력점이 발생하는 case 1의 그림자 조건에 따른 실험용 PV array의 P-V 특성곡선을 나타내고 그림 9(b)는 세 개의 지역적인 최대

전력점이 발생하는 case 4의 그림자 조건에 따른 실험용 PV array의 실험 P-V 특성곡선을 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 시뮬레이션 결과 그림 5(c)와 동일하게 나타난다. 그림 9(a)는 그림 5(c)의 case 1과 동일하게 두 개의 지역적인 최대전력점이 나타나며 그림 9(b)는 그림 5(c)의 case 4와 동일하게 세 개의 지역적인 최대전력점이 나타난다. 그림 9(a) 그림 9(b) 모두 그림 5의 case 1과 case 4와 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 직류 발전 전력을 분석하였다. 전반적으로 블록킹 다이오드를 사용하지 않는 것이 유리함을 보였으며 그중에서도 병렬접속이 가장 우수했다. 병렬우선 직병렬접속(2Sx3P)는 직렬우선 직병렬접속(3Sx2P)보다는 좋았으며 순수한 직렬접속 방식은 두 접속 구조의 중간 정도의 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 않음으로써, 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)

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구에 의해 지원되었음. (과제번호: R17XA05-46)

References

- [1] H. Ziar, S. Mansourpour, E. Afjei, and M. Kazemi, “Bypass diode characteristic effect on the behavior of solar PV array at shadow condition,” in *2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), Tehran, Iran, Feb. 2012*.
- [2] K. Kato and H. Koizumi, “A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer,” in *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Lisbon, Portugal, May. 2015*.
- [3] Y. Kanesaka, K. Iida, and J. Kondoh, “Analyses of

string current and loss in blocking diodes in PV power system,” in *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, Japan*, Nov. 2016.

- [4] B. Veerasamy, T. Takeshita, A. Jote, and 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.



정우용(鄭雨龍)

1992년 1월 29일생. 2019년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2019년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



김용중(金龍中)

1988년 11월 10일생. 2013년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오까야마 대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.